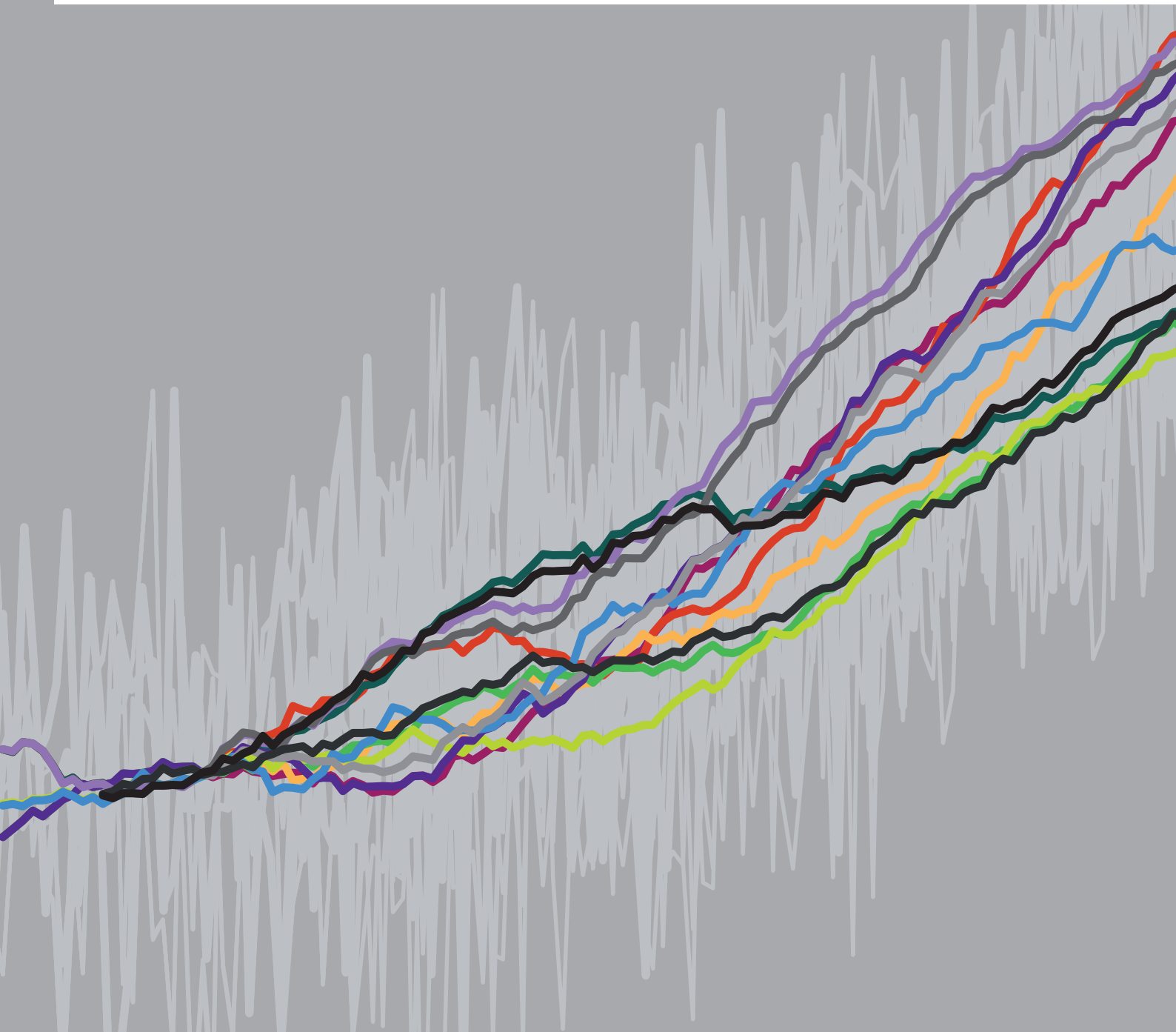


CSC Report 6

Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

Covermotiv:

Ausschnitt einer Grafik, die Zeitreihen der projizierten Temperaturänderungen (gleitendes 31-Jahresmittel) relativ zu 1971-2000 verschiedener regionaler Klimasimulationen für das Gebietsmittel Deutschland zeigt, hinterlegt sind die Jahreswerte der Simulationen

Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland:

Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung

Autoren:

Daniela Jacob, Katharina Bülow, Lola Kotova, Christopher Moseley,
Juliane Petersen, Diana Rechid

Danksagung:

Die hier veröffentlichten Ergebnisse sind in folgenden Projekten und in der Zusammenarbeit mit folgenden Projektpartnern entstanden:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



Niedersachsen



Vielen Dank an Dr. Barbara Hennemuth für den internen Review und an Dr. Klaus Keuler von der BTU Cottbus für den externen Review dieses Reports. Die zahlreichen Anmerkungen haben sehr zu Verbesserung von Struktur und inhaltlicher Umsetzung beigetragen.

Kontakt:

Prof. II Dr. Daniela Jacob
Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Climate Service Center (CSC)
Fischertwiete 1
20095 Hamburg
Daniela.Jacob@hzg.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung	8
2 Methodik regionaler Klimaprojektionen	10
3 Modellensemble für Europa.....	14
3.1 Das Projekt ENSEMBLES	14
3.2 Bandbreiten der Simulationsergebnisse	17
4 Hochaufgelöste Simulationen für Deutschland.....	21
4.1 Übersicht zu den Simulationen	21
4.2 Intra-Modellstudie mit REMO.....	22
4.3 Evaluierung der Modellsimulationen	25
5 Rheineinzugsgebiet	29
5.1 Das Projekt KLIWAS.....	29
5.2 Einfluss der Globalmodelle	29
6 Niedersachsen.....	33
6.1 Das Projekt KLIFF	33
6.2 Bias-korrigierte Datensätze	33
7 Metropolregion Hamburg	36
7.1 Das Projekt KLIMZUG-NORD	36
7.2 Bandbreite der projizierten Klimaänderungen	36
8 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	40
9 Literaturverzeichnis	42
Anhang I: Regionale Klimamodelle in Deutschland.....	46
Anhang II: Projekte – Adressen – Internetseiten	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1	ENSEMBLES-Regionen für die regionalen Klimasimulationen	15
Abbildung 3.2	Klimaänderungssignal (2021-2050 minus 1961-1990) der 2 m - Temperatur [°C]	16
Abbildung 3.3	Klimaänderungssignal (2021-2050 minus 1961-1990) des Niederschlags [%]	16
Abbildung 3.4	Projizierte Änderung der 2 m-Temperatur im A1B-Szenario simuliert mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen in Winter (oben) und Sommer (unten) im Gebietsmittel Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 11-Jahresmittel)	17
Abbildung 3.5	Projizierte Änderung des Niederschlags im A1B-Szenario simuliert mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen in Winter (oben) und Sommer (unten) im Gebietsmittel Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 11-Jahresmittel)	18
Abbildung 3.6	Projizierte Änderung der 2 m-Temperatur simuliert mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen in Winter (oben) und Sommer (unten) im Gebietsmittel Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in grau die Jahreswerte aller Simulationen	19
Abbildung 3.7	Projizierte Änderung des Niederschlags [%] simuliert mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen in Winter (oben) und Sommer (unten) im Gebietsmittel Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in grau die Jahreswerte aller Simulationen	19
Abbildung 4.1	Dynamisches Doppelnestungsverfahren mit REMO zur Projektion möglicher Klimaänderungen für Deutschland in horizontaler Auflösung von 10 x 10 km ²	22
Abbildung 4.2	Mittlere saisonale Änderung der 2 m-Temperatur [K] (links) und relative Änderung des saisonalen Niederschlags [%] (rechts) der REMO-A1B_1 Projektion 2071-2100 im Vergleich zur Kontrollperiode C20_1 1971-2000	23
Abbildung 4.3	Projizierte Änderung der 2 m-Temperatur [K] simuliert mit 9 REMO Projektionen in Winter (oben) und Sommer (unten) für Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in grau die Jahreswerte aller Simulationen	24
Abbildung 4.4	Projizierte Änderung des Niederschlags [%] simuliert mit 9 REMO Projektionen im Winter (oben) und im Sommer (unten) für Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in grau die Jahreswerte aller Simulationen	24
Abbildung 4.5	Jahreszyklen von Temperatur [°C] (links) und Niederschlag [mm/Monat] (rechts) dreier verschiedener Beobachtungsdatensätze sowie der regionalen Klimamodelle REMO und CLM, gemittelt über Deutschland	26
Abbildung 4.6	Bias der 2 m-Temperatur [°C] für das Mittel aus der 1. bis 3. Realisierung von REMO (oben) und CLM (unten) für den Zeitraum 1961-2000. Jahreszeitenmittel von links nach rechts: DJF, MAM, JJA, SON	27
Abbildung 4.7	Bias des Niederschlags [%] für das Mittel aus der 1. bis 3. Realisierung von REMO (oben) und CLM (unten) für den Zeitraum 1961-2000. Jahreszeitenmittel von links nach rechts: DJF, MAM, JJA, SON	27
Abbildung 4.8	Bias des Niederschlags [%] im Jahresmittel für die erste REMO-Realisierung für den Zeitraum 1961-2000. Links: Original REMO-Niederschlag. Rechts: REMO-Niederschlag nach Bias-Korrektur (man beachte die feiner aufgelöste Farbskala!)	28
Abbildung 5.1	Modellkette des KLIWAS-Projekts „Hydrologie und Binnenschifffahrt“ Quelle: Enno Nilson, KLIWAS Tagungsband, Bonn, März 2009	29
Abbildung 5.2	Änderung der Jahresmitteltemperatur [K] in 2 m Höhe für das Rheineinzugsgebiet relativ zum Mittel der Jahre 1971- 2000, gleitendes 10-Jahres Mittel	30

Abbildung 5.3	Änderung der mittleren Temperaturen [K] in 2 m Höhe; im Winter (DJF; links) und Sommer (JJA; rechts) für das Rheineinzugsgebiet relativ zum Mittel der jeweiligen Jahreszeiten der Jahre 1971-2000, gleitendes 10-Jahresmittel	30
Abbildung 5.4	Änderung des mittleren Jahresniederschlags [%] für das Rheineinzugsgebiet relativ zum Mittel der Jahre 1971- 2000, gleitendes 10-Jahresmittel	31
Abbildung 5.5	Änderung des mittleren Niederschlags [%] im Winter (Dezember bis Februar; links) und Sommer (Juni bis August, rechts) für das Rheineinzugsgebiet relativ zum Mittel der Jahre 1971- 2000 für die Jahreszeit, gleitendes 10-Jahresmittel	31
Abbildung 6.1	Links: Klimatologischer Jahresgang des Niederschlags [mm/Monat] (Gebietsmittel Niedersachsen) für drei REMO-Realisierungen, sowie der Bias-Korrektur der 1. Realisierung und den REGNIE-Beobachtungsdaten (Zeitraum 1961-2000). Rechts: Jahresmittel für dieselben Datensätze	34
Abbildung 6.2	Links: Klimatologischer Jahresgang der 2 m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Niedersachsen, in °C) für das Mittel aus der 3 REMO- und CLM-Realisierungen für den Zeitraum 1961-2000, verglichen mit dem KLIFF-Beobachtungsdatensatz. Rechts: Klimatologischer Jahresgang der mittleren Abweichungen der Tagesminima und -maxima der 2 m-Temperatur [K] vom Tagesmittel für dieselben Datensätze	35
Abbildung 7.1	Simulierte Jahresmittel der Einzeljahre (links) und des mittleren Jahresgangs 1961-2000 (rechts) der 2 m-Temperatur [°C] (oben) und des Niederschlags [mm/Monat] (unten) in der Metropolregion Hamburg im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD	37
Abbildung 7.2	Projizierte Änderung der 2 m-Temperatur [K] simuliert mit REMO und CLM im Winter (oben) und im Sommer (unten) für MRH relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in grau die Jahreswerte aller Simulationen	38
Abbildung 7.3	Projizierte Änderung des Niederschlags [%] im Winter (oben) und im Sommer (unten) simuliert mit REMO und CLM für MRH relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in grau die Jahreswerte aller Simulationen.	38
Abbildung 7.4	Mittelwert und Bandbreite der projizierten Änderungen der 2 m-Temperatur [°C] (links) und des Niederschlags [%] (rechts) simuliert mit REMO und CLM zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts relativ zu 1971-2000	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Zehn Forschungsbereiche des Projekts ENSEMBLES	14
Tabelle 3.2	Kombinationen von globalen/regionalen Klimamodellen in ENSEMBLES	16
Tabelle 4.1	Übersicht hochaufgelöster regionaler Klimasimulationen für Deutschland von REMO, CLM, WETTREG, STARII	21

Abkürzungsverzeichnis

AR4	Assessment Report 4 – 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel
AR5	Assessment Report 5 – 5. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel
BCM	Bergen Climate Model
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVBS	Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
C20	Gegenwartssimulation des 20. Jahrhunderts
CERA	Climate and Environmental Data Retrieval and Archive; Datenbank des WDCC am DKRZ
CLM	Climate Limited Area Model
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CORDEX	COordinated Downscaling EXperiments
CRU	Climate Research Unit
CSC	Climate Service Center
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
DMI	Dänisches Meteorologisches Institut
DWD	Deutscher Wetterdienst
E-OBS	ENSEMBLES Observation data; Beobachtungsdatensatz des ENSEMBLES-Projekts
ECHAM5	Globales Atmosphärenmodell Version 5 des MPI-M Hamburg
ERA-Interim	Globales atmosphärisches Reanalyseprodukt vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (engl. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)
HadCM3	Hadley Center Coupled Model Version 3
HadRM3	Hadley Center Regional Climate Model Version 3
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change; Zwischenstaatlicher Ausschuss zum Klimawandel
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace, Paris
K	Kelvin
MRH	Metropolregion Hamburg
EU	Europäische Union
MPI-ESM	MPI Earth System Model
MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
MPIOM	MPI Ocean Model
NN	Höhe über Normal Null
RACMO	Regional Atmospheric Climate Model
RCA	Rosby Centre Regional Atmospheric Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
REGCM3	Regional Climate Model Version 3
REGNIE	Regionalisierung von Niederschlagshöhen – Beobachtungsdatensatz des DWD
REMO	REgional MOdell

RT	Research Themes
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
STAR	Statistical Regional Model
UBA	Umweltbundesamt
WCRP	World Climate Research Program
WDCC	World Data Center for Climate
WETTREG	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode

1 Einleitung

Mit regionalen Klimamodellen werden globale Klimaprojektionen für einzelne Regionen räumlich verfeinert. Daraus können Informationen über projizierte Änderungen des regionalen Energie- und Wasserhaushalts abgeleitet werden. Weiterhin werden die Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen zum Antrieb von Wirkmodellen genutzt. Damit können unter anderem die Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf den Abfluss in Oberflächengewässern, den Wasser- und Stoffhaushalt von Ökosystemen, auf Verkehrs- und Wasserwege, auf die Land- und Forstwirtschaft oder auch die Wärmebelastung in städtischen Räumen untersucht werden. Die Ergebnisse regionaler Modellstudien sind für viele gesellschaftliche und wirtschaftliche Fragestellungen und Prozesse von Bedeutung, wie zur Identifizierung von Anfälligkeiten und Risiken, zur Entwicklung von Handlungsstrategien und möglicher präventiver Maßnahmen zur Einsparung volkswirtschaftlicher Ressourcen.

Der vorliegende Bericht enthält eine Übersicht zu regionalen Klimaprojektionen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M), des Climate Service Center (CSC) und weiterer Forschungsinstitutionen, die im Rahmen verschiedener internationaler und nationaler Forschungsprojekte und Aktivitäten erstellt wurden. Es werden Arbeiten mit dem Schwerpunkt Deutschland dargestellt. Zur Interpretation der Ergebnisse ist es notwendig, die Methodik zur Erstellung regionaler Klimaprojektionen in die Betrachtung mit einzubeziehen. Diese wird in einem weiteren einleitenden Kapitel kurz vorgestellt, mit Verweisen auf weiterführende Informationen und Veröffentlichungen (s. Kapitel 2). Dabei werden auch Möglichkeiten und Grenzen regionaler Klimamodellierung aufgezeigt.

In fünf weiteren Kapiteln werden die Simulationen und einige Beispielergebnisse der einzelnen Projekte vorgestellt. Die Projekte widmen sich verschiedenen geografischen Regionen und Themenschwerpunkten. Detaillierte Informationen zu den Projekten selbst finden sich in den Kompetenzen der einzelnen Projekte (s. Kontaktinformationen in Anhang II).

- Im Rahmen des EU-Projekts **ENSEMBLES** als Teil des FP6-Forschungsprogramms der europäischen Kommission wurde in internationaler Zusammenarbeit von vielen Projektpartnern eine Vielzahl globaler und regionaler Klimasimulationen mit verschiedenen Global-/Regionalmodellkombinationen für Europa und Afrika erstellt und ausgewertet. Diese Simulationen sind über die zentrale Datenbank des Dänischen Meteorologischen Instituts (DMI) verfügbar (Kapitel 3).
- Für Deutschland (Kapitel 4) stehen zahlreiche hoch aufgelöste regionale Klimasimulationen zur Verfügung, die zum Teil im Auftrag des Umweltbundesamtes **UBA** oder als vom Bundesministerium für Bildung und Forschung **BMBF** geförderten Konsortialrechnungen erstellt wurden und in der Klimafolgenforschung verwendet werden.
- Im Rahmen des Ressortforschungsprogramms **KLIWAS** des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) werden im Vorhaben 4 unter Federführung der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) mögliche Folgen des Klimawandels für die Gewässer und die Schifffahrt abgeschätzt. Dazu werden zunächst Szenarien entwickelt, die mögliche Klimaänderungen und daraus folgende veränderte Abflüsse, Sedimentfrachten und veränderte Gerinnemorphologien umfassen. Ziel dieser Arbeiten ist es, die Bandbreite möglicher zukünftiger (kritischer) hydraulisch/morphologischer Verhältnisse im Vergleich zu heute abzuschätzen (Kapitel 4).
- In dem vom Niedersächsischen Ministerium für Bildung und Wissenschaft geförderten Projekt **KLIFF** (Kapitel 6) werden die möglichen regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Agrar- und Forstwirtschaft sowie auf die Binnengewässer und die Küsten in Niedersachsen untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen für die Entwicklung von Anpassungsstrategien herangezogen werden.

- Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts **KLIMZUG-NORD** (Kapitel 7) liegt der Fokus auf Entwicklung und Ausbau eines interdisziplinären Netzwerks zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Behörden und Öffentlichkeit zur Entwicklung strategischer Anpassungsansätze an den Klimawandel in der Metropolregion Hamburg. In der Querschnittsaufgabe Klimawandel werden Klimaänderungsinformationen für Norddeutschland aufbereitet und bereitgestellt. Ferner wird zum Umgang mit regionalen Klimadaten und ihren Unsicherheiten beraten. In Teilprojekt T3.1 wird darüber hinaus die Bandbreite regionaler Klimaänderungen in der Metropolregion Hamburg untersucht.

Zur Zeit werden am CSC neue hochaufgelöste Klimaprojektionen in einer Horizontalauflösung von 0.11° für ganz Europa im Rahmen der am CSC koordinierten Aktivitäten zu **EURO-CORDEX** (Kapitel 8) errechnet. Diese Simulationen regionalisieren neue globale Szenarien, die auf dem Konzept der sogenannten „Representative Concentration Pathways“ - RCPs - (MOSS ET AL., 2010) basieren. Um einen Bezug der REMO-Simulationen basierend auf diesen neuen Szenarien zu den bislang verwendeten zu ermöglichen, wurde eine Simulation des Globalmodells ECHAM5-MPIOM basierend auf dem IPCC Emissionsszenario A1B (SRES, 2000) für Europa in 0.11° Horizontalauflösung erstellt. Diese Simulationen wurden im Rahmen des EU-Projektes **CLIMATE FOR CULTURE** als Teil des Forschungsprogramms FP7 erstellt.

In der Übersicht zu den am MPI-M und CSC im Rahmen der vorgestellten Projekte erarbeiteten regionalen Klimaprojektionen für Europa und Deutschland synthetisiert dieser Bericht einige Ergebnisse für die projizierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen. Er soll damit zum Verständnis der Bandbreite möglicher Klimaänderungen in den unterschiedlichen Regionen beitragen.

2 Methodik regionaler Klimaprojektionen

Regionale Klimaprojektionen werden auf der Basis globaler Klimasimulationen erstellt, denen verschiedene Emissionen klimawirksamer Treibhausgase und Aerosole zugrunde liegen.

Emissionsszenarien

Um mögliche Entwicklungen des Klimas im 21. Jahrhundert abzuschätzen, wurden im Rahmen des Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC: www.ipcc.ch) globale Emissionsszenarien der wichtigsten anthropogenen Treibhausgase und Aerosole erstellt und im „Special Report on Emissions Scenarios“ (SRES, 2000) veröffentlicht. Die IPCC Hauptszenarien (A1, B1, A2, B2) treffen jeweils bestimmte Annahmen zur demografischen, ökonomischen, ökologischen und technologischen Entwicklung. Basierend auf diesen Annahmen werden mit Hilfe von biogeochemischen Modellen die zeitlichen Verläufe der atmosphärischen Konzentrationen klimawirksamer Treibhausgase und Aerosole bis 2100 berechnet. Diese Emissionsszenarien liegen auch den Klimasimulationen des 4. Sachstandsberichts AR4 des IPCC (2007) zugrunde. Im Rahmen der aktuellen Arbeiten zum 5. Sachstandsbericht AR5 des IPCC wurde ein neues Konzept für die Erstellung globaler Szenarien entwickelt, das auf sogenannten „Representative Concentrations Pathways“ (RCPs) (MOSS ET AL., 2010) beruht. Sie repräsentieren verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgaskonzentrationen entsprechend eines vorgegebenen Strahlungsantriebs, der neben Treibhausgasemissionen auch Landnutzungsänderungen berücksichtigt. In diesem Bericht werden ausschließlich Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen, basierend auf den im Rahmen des 4. Sachstandsberichts des IPCC verwendeten Emissionsszenarien (SRES, 2000), vorgestellt.

Globale Klimasimulationen

Die Treibhausgaskonzentrationen der SRES (2000) Szenarien werden den globalen Klimamodellen (dreidimensionale Zirkulationsmodelle des Klimasystems, zumeist gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle) als Randbedingung vorgegeben, um die Auswirkungen auf das globale Klima zu berechnen. Um anthropogene Klimaänderungen von der natürlichen Variabilität des Klimas zu unterscheiden, werden zunächst Kontrollsimulationen für mehrere hundert Jahre mit konstanten prä-industriellen Treibhausgaskonzentrationen durchgeführt. Die damit simulierten Schwankungen des Klimas beruhen auf internen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems im Modell und auf Veränderungen exogener Faktoren wie der solaren Einstrahlung, sofern diese in den Simulationen berücksichtigt werden (z. B. BENGTTSSON ET AL., 2006). Zu einem beliebigen Zeitpunkt dieser Kontrollsimulationen im prä-industriellen „Gleichgewicht“ können dann dem Globalmodell die von 1860 bis heute beobachteten Treibhausgaskonzentrationen vorgegeben und damit das vergangene Klima simuliert werden. Da die Wahl des Startzeitpunkts den Verlauf der Klimazeitreihe beeinflusst, kann die Simulation des historischen Klimas mehrmals zu verschiedenen Zeitpunkten der prä-industriellen Kontrollsimulation gestartet und damit mehrere Realisierungen des historischen Klimas erzeugt werden. Diese Simulationen werden auch als Kontrollsimulationen des historischen Klimas bezeichnet. Zum Ende der Simulation des historischen Klimas werden die Treibhausgaskonzentrationen der verschiedenen Emissionsszenarien dem Globalmodell als Randbedingungen vorgegeben und damit Klimaprojektionen für das zukünftige Klima erstellt. Auch die Klimaprojektionen werden ausgehend von der entsprechenden Realisierung des Kontrollklimas in mehreren Realisierungen gerechnet. Die damit projizierten Klimaänderungen zeigen eine Bandbreite möglicher globaler Klimaentwicklungen auf (IPCC, 2007).

Regionale Klimaprojektionen

Um die Auswirkungen globaler Klimaänderungen auf regionalem Maßstab zu untersuchen, werden Simulationen mit regionalen Klimamodellen durchgeführt. Diese verwenden die global simulierten großskaligen Strömungen der Atmosphäre und verfeinern sie für ausgewählte Ausschnitte der Erde. Mit der höheren Horizontalauflösung können meso-skalige Prozesse erfasst und extreme Wetterereignisse wie starke konvektive Niederschläge

oder Sturmtiefs besser repräsentiert oder erst aufgelöst werden. Die hohe räumliche Auflösung der Simulationsergebnisse ermöglicht die Darstellung kleinräumiger Klimaänderungsmuster, die für gesellschaftliche Anwendungen relevant und für die Erforschung lokaler Klimafolgen notwendig ist.

Es werden statistische und dynamische Regionalisierungsverfahren unterschieden. Dynamische Regionalmodelle sind atmosphärische Zirkulationsmodelle, die in einem dreidimensionalen Ausschnitt des Globus' alle relevanten physikalischen Prozesse in der Atmosphäre berechnen. Zudem werden thermische und hydrologische Prozesse im Boden berücksichtigt, die den Austausch von Energie, Masse und Impuls an der Erdoberfläche beeinflussen. Damit können auch nicht-lineare Wechselwirkungen zwischen Land und Atmosphäre erfasst werden. Zudem werden regionale Modelle mit hochauflösenden Ozeanmodellen oder dynamischen Vegetationsmodellen gekoppelt.

Ein dynamisches Regionalmodell wird zu Beginn einer Simulation mit den Ergebnissen eines globalen Klimamodells initialisiert und benötigt im Verlauf der Simulation zu jedem Zeitpunkt Informationen über den großskaligen Zustand der Atmosphäre am Rand des regionalen Gebietsausschnitts. Diese liegen aus den Globalmodellen meist alle 6 Stunden (horizontale Auflösung meist 200 km bis 300 km) vor. Im Inneren des Modellgebietes wird dann mit höherer horizontaler Auflösung (etwa zwischen 50 km und 2.5 km) das regionale Klima berechnet. Bei großen Unterschieden der Horizontalaufösungen werden mehrere Nestungsschritte vorgenommen, d.h. das Regionalmodell wird zunächst in gröberer Auflösung (z. B. 50 km) mit den Ergebnissen des Globalmodells angetrieben und im nächsten Schritt wird das Regionalmodell in hoher Auflösung (z.B. 10 km) mit den Ergebnissen des Regionalmodells in gröberer Auflösung angetrieben. Mit der hohen räumlichen Auflösung können die Eigenschaften der Erdoberfläche wie Orographie und Landbedeckung besser repräsentiert und mesoskalige Prozesse wie Wolken- und Niederschlagsbildung erfasst werden. Damit werden aus globalen Klimaprojektionen hochaufgelöste Klimaänderungsinformationen für spezielle Regionen erzeugt. Je nach Lage der Region dominieren die am Rand vorgegebenen großskaligen Strömungen des Globalmodells oder die lokalen Gegebenheiten und kleinräumigen Prozesse das simulierte regionale Klima.

Statistische Klimamodelle analysieren empirische Zusammenhänge zwischen der beobachteten großräumigen Zirkulation in der Atmosphäre und dem lokalen Wettergeschehen (auf Stationsbasis) und wenden diese auf Ergebnisse globaler Klimaprojektionen und die daraus folgenden lokalen Klimaänderungen an. Statistische Modelle erlauben bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand die Erstellung vieler Realisierungen verschiedener Klimaprojektionen. Damit stellen sie eine gute Ergänzung dynamischer Modellsimulationen dar. Physikalische Konsistenzen und Rückkopplungsprozesse können mit statistischen Modellen nicht direkt erfasst werden.

Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen

Regionale Klimaprojektionen geben keine Prognose zur regionalen Klimaänderung, sondern projizieren verschiedene Möglichkeiten regionaler Klimaänderungen in die Zukunft. Die Bandbreite dieser Möglichkeiten entsteht zum einen durch verschiedene Annahmen über mögliche zukünftige sozioökonomische Entwicklungen und die daraus folgenden atmosphärischen Konzentrationen anthropogener Treibhausgase und Aerosole. Die Klimaprojektionen auf Basis dieser unterschiedlichen Emissionsszenarien zeigen das Spektrum möglicher Klimaänderungen auf, das durch menschliches Handeln beeinflusst wird. Doch die Klimaprojektionen auf Basis eines dieser Emissionsszenarien ergeben ebenfalls für sich betrachtet eine Bandbreite möglicher Klimaänderungen, die zum einen auf der natürlichen, systemimmanenten Variabilität des Klimas beruht, zum anderen aber auch durch Unsicherheiten der Modellierungsmethoden entsteht. Je nach Fragestellung der Klimafolgenforschung, sind die verschiedenen Szenarien separat oder gemeinsam zu betrachten.

- **Bandbreite durch Emissionsszenarien:** Die zukünftige Entwicklung der Emissionen von klimawirksamen Treibhausgasen und Aerosolen kann nicht vorhergesagt werden, sie kann nur für verschiedene Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung, der Weltwirtschaft und des technologischen Fortschritts projiziert werden. Dazu wurden die oben beschriebenen Emissionsszenarien entwickelt. Sie liefern je nach Szenario einen bestimmten zeitlichen Verlauf von abnehmenden bis stark ansteigenden Treibhausgasemissionen, die den Klimamodellen als Randbedingung vorgegeben werden. Die damit projizierten Klimaänderungen spannen eine Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen auf.
- **Bandbreite durch Klimavariabilität:** Die natürliche Klimavariabilität entsteht zum einen durch externe Einflüsse wie Schwankungen der Solarstrahlung oder Vulkanausbrüche, und zum anderen durch interne, nichtlineare Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems Atmosphäre, Ozean, Land Kryosphäre und Biosphäre. Die natürlichen Klimaschwankungen werden in langen Simulationen über mehrere Jahrhunderte oder durch mehrere Realisierungen des historischen Klimas und des projizierten Klimas berücksichtigt, die sich jeweils nur in den Anfangsbedingungen unterscheiden, denen aber jeweils identische Treibhausgaskonzentrationen vorgeschrieben werden (s. oben). Die damit simulierte interne Klimavariabilität stimmt im Idealfall mit der beobachteten Variabilität des Klimas überein. Dies ist jedoch schwierig zu belegen, da die verfügbaren Beobachtungsreihen meist zu kurz sind. Die simulierten Schwankungen geben zumindest einen Hinweis auf die Bandbreite natürlicher Klimaschwankungen.
- **Bandbreite durch Unsicherheiten der Modellierungsmethoden:** Die Unsicherheiten der Modellierungsmethoden sind grundsätzlich von den systemimmanenten Unsicherheiten durch natürliche Klimavariabilität zu unterscheiden. Sie können prinzipiell durch Verbesserung der Methoden verringert werden. Sie ergeben sich zum einen aus dem unvollständigen Wissen über Prozesse im Klimasystem, die somit auch in Klimamodellen unzureichend erfasst sind. Zum anderen entstehen sie durch unzureichende Beschreibung kleinräumiger Prozesse, die in den Modellen nicht explizit aufgelöst, sondern über empirische Parametrisierungen annäherungsweise erfasst werden. Systematische Abweichungen der Simulationsergebnisse vom tatsächlich beobachteten Klima (engl. „bias“) können durch Modellevaluierung mittels Vergleich zu Messungen erkannt werden. Doch auch diese Vorgehensweise weist Unsicherheiten auf, da Messungen selbst und auch die Interpolation der Beobachtungsdaten in die Fläche Fehler aufweisen. Obwohl die meisten Klimamodelle dieselben physikalischen Prinzipien und die für Wetter und Klima relevanten Prozesse berücksichtigen, unterscheiden sich die mathematischen Beschreibungen dieser Prozesse sowie die verwendeten numerischen Lösungsverfahren. Das führt dazu, dass verschiedene Modelle unterschiedliche systematische Abweichungen zeigen. Darüber hinaus können sich auch Simulationen eines Klimamodells für verschiedene gewählte Modellkonfigurationen voneinander unterscheiden. Für Regionalmodelle spielen beispielsweise Größe und Lage des Modellgebiets eine wesentliche Rolle.

Bei regionalen Klimasimulationen ist zusätzlich zu beachten, dass die Kombination aus Globalmodell-Regionalmodell eigentlich als ein einziges zusammengesetztes Modell zu betrachten ist, und die Unsicherheiten sowohl aus dem Global- als auch aus dem Regionalmodell stammen. Die Klimavariabilität durch interne Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean wird durch gekoppelte Globalmodelle erfasst und über die großskalige atmosphärische Strömung an das Regionalmodell weitergegeben. In den dynamischen Regionalmodellen kann die Klimavariabilität zudem durch kleinräumigere, nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Land und Atmosphäre beeinflusst werden. Es wurden verschiedene Methoden verwendet, um den Anteil der Klimavariabilität, der allein von den Regionalmodellen simuliert wird, abzuschätzen (ALEXANDRU ET AL., 2007; LUCAS-PICHER ET AL., 2008).

Um die gesamte Bandbreite möglicher Klimaänderungen zu erfassen, werden „Ensemble“ von Klimasimulationen erstellt, die

- verschiedene Global-/Regionalmodell-Kombinationen
- mehrere Realisierungen einer Klimasimulation
- und je nach Fragestellung ein oder mehrere Emissionsszenarien

kombinieren. Verschiedene Beispiele für die Anwendung und Ergebnisse des Ensemble-Ansatzes werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

3 Modellensemble für Europa

3.1 Das Projekt ENSEMBLES

Das Projekt ENSEMBLES als Teil des FP6-Forschungsprogramms der Europäischen Kommission wurde vom Met Office Hadley Centre in Exeter über den Zeitraum 2004-2009 koordiniert. In dessen Rahmen wurden diverse globale und regionale Klimasimulationen für Europa und Afrika produziert und ausgewertet (HEWITT, GRIGGS, 2004), die auch für die Klimafolgenforschung zur Verfügung stehen. Am MPI-M wurden mit REMO regionale Simulationen für Europa in einer Horizontalauflösung von 0.22° erstellt, die zum einen mit dem Globalmodell ECHAM5-MPIOM und zum anderen mit dem Globalmodell des IPSL angetrieben wurden.

Die Grundidee des Projekts ist es, möglichst viele globale und regionale Klimamodelle für dasselbe Gebiet, dieselben Zeiträume und in denselben Auflösungen anzuwenden, um ein Modellensemble zu erzeugen. Dabei haben sich die Projektpartner auf die Simulation des A1B-Szenarios verpflichtend geeinigt. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, soll mit dieser Methode die Verlässlichkeit der Projektionen verbessert und Unsicherheiten quantitativ geschätzt werden. Die allgemeinen Ziele des Projekts sind wie folgt angegeben (VAN DER LINDEN, MITCHELL, 2009):

- Paare aus globalen und regionalen Klimamodellen, die in Europa entwickelt wurden, werden auf systematische Weise kombiniert, um ein Ensemble aus Klimaprojektionen zu erzeugen. Die Klimasimulationen werden gegen hochaufgelöste Beobachtungsdatensätze validiert und für saisonale, dekadische, und langjährige Zeitskalen analysiert. Es wird eine probabilistische Methode entwickelt, um die Unsicherheit der Klimaprojektionen abzuschätzen.
- Die Klimamodelle werden zu Erdsystemmodellen erweitert. Ein Erdsystemmodell schließt neben der Klimamodellierung auch die Modellierung des Wasserdargebots, der Landnutzung, der Qualität der Luft und des Kohlenstoffkreislaufs mit ein.
- Die Modellierungsergebnisse werden für anwendungsbezogene Studien („Impact-Studien“) herangezogen, die Landwirtschaft, Gesundheitssystem, Ernährung, Energie, Wasser und Versicherungswesen mit einschließen.

ENSEMBLES wurde in zehn Forschungsbereiche („Research Themes“, RT) aufgeteilt, die die folgenden Aufgaben hatten:

RT0	Projektmanagement
RT1	Entwicklung des Ensemble basierten Modellierungssystems, Kombination von globalen und regionalen Erdsystemmodellen zu einem Multi-Modellsystem
RT2A	Durchführung der Klimasimulationen mit verschiedenen Globalmodellen
RT3	Bereitstellung regionaler Klimamodelle für zwei Regionen: Eine europäische Region mit den Auflösungen $25 \times 25 \text{ km}^2$ und $50 \times 50 \text{ km}^2$ für den Zeitraum 1958-2002, und eine Region, die einen großen Teil Afrikas einschließt, für den Zeitraum 1989-2005 (Abbildung 3.1). Zur Modellvalidierung wurden ERA-40 Reanalysedaten für die europäische Region bzw. ERA-Interim für die afrikanische Region verwendet.
RT2B	Durchführung hochaufgelöster regionaler Klimaprojektionen. Dies wurde durch ein Downscaling der von RT2A gewonnenen Ergebnisse mit den statistischen und dynamischen Methoden, die in RT3 bereitgestellt wurden, in den beiden genannten Regionen erreicht. Es führte zu einer Vielzahl aus Kombinationen globaler und regionaler Klimamodelle, die in der Tabelle 3.2 dargestellt sind.
RT4	Weiterentwicklung des Verständnisses der Prozesse, die die Klimavariabilität und -änderung steuern, sowie Untersuchungen zur Klimavorhersagbarkeit und zur Auftretswahrscheinlichkeit von Extremereignissen. Hierzu wurden die Daten aus den Teilprojekten RT2A und RT2B herangezogen. Ein weiteres Untersuchungsgebiet waren die Rückkopplungen im Klimasystem.
RT5	Entwicklung hochaufgelöster Beobachtungsdatensätze, mit denen die Modellsimulationen aus RT2A und RT2B verglichen wurden. Es handelt sich um tägliche Datensätze für 2 m-

	Temperatur und Niederschlag, die auf den von RT3 gewählten Gittern vorliegen.
RT6	Durchführung von Impact-Studien
RT7	Entwicklung von Emissionsszenarien und Landnutzungsänderungsszenarien
RT8	Entwicklung eines Bildungsprogramms zur Vermittlung des ENSEMBLES-Forschungsprogramms in Form von Seminaren, Workshops, Sommerschulen, wissenschaftlichen Publikationen und Kursen für Doktoranden

Tabelle 3.1 Zehn Forschungsbereiche des Projekts ENSEMBLES

Abbildung 3.1 zeigt die beiden ENSEMBLES Modellgebiete, für die regionale Klimasimulationen erstellt wurden. Die in Tabelle 3.2 aufgelisteten Datensätze stehen auf der ENSEMBLES-Homepage zum Herunterladen zur Verfügung: <http://ensemblesrt3.dmi.dk>. Die Tabelle zeigt den derzeit verfügbaren Datenbestand seit Juni 2010

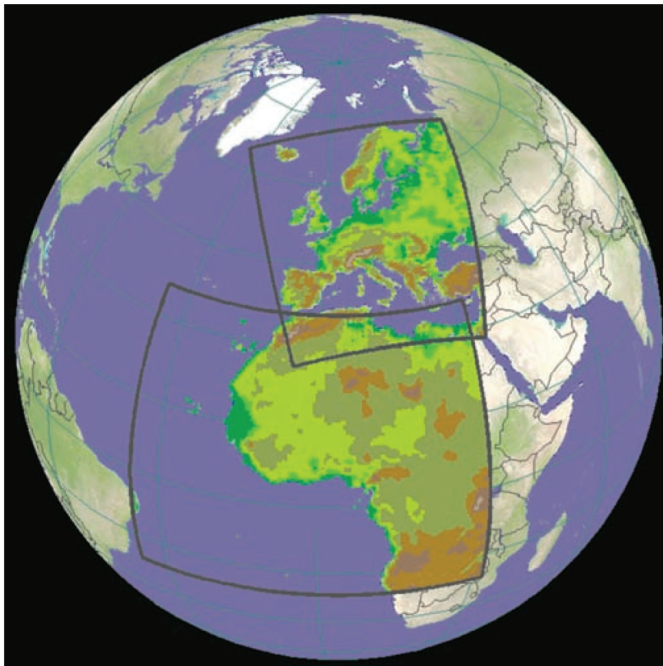


Abbildung 3.1: ENSEMBLES-Regionen für die regionalen Klimasimulationen

ENSEMBLES GCM-RCM Matrix 8/6/2010

Global model Regional inst.	METO-HC Standard	METO-HC Low sens.	METO-HC Hi sens.	MPIMET Standard	MPIMET Ens.m. 1	MPIMET Ens.m. 2	IPSL	CNRM	NERSC	MIROC	CGCM3	Total number
METO-HC	2100	2100*	2100*	2100 (late 2010)								4
MPIMET				2100			2050*					2
CNRM								2100				1
DMI				2100*				2100	2100*			3
ETH	2100											1
KNMI				2100* 2100	2100*	2100*				2100*		1+4
ICTP				2100								1
SMHI		2100*		2100* 2100*					2100			3+1
UCLM	2050											1
C4I			2100*		2050 (A2)*							2
GKSS							2050*					1
METNO	2050*								2050*			1
CHMI								2050* (12/2009)				1
OURANOS**											2050*	1
VMGO**	2050*											1
Total (1951- 2050)	5	2	2	7+2	0+1	0+1	2	3	3	0+1	1	25+5

Tabelle 3.2: Kombinationen von globalen/regionalen Klimamodellen in ENSEMBLES. **Rot:** Per Download verfügbar (Stand 08.06.2010); *: keine obligatorischen Läufe; **: Projektpartner ohne Verpflichtung; unterstrichen: 50 km horizontale Auflösung (sonst 25 km)

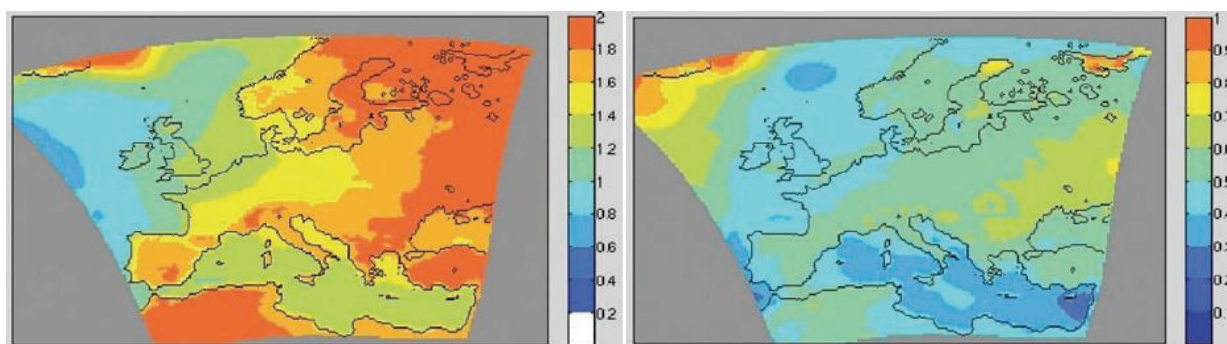


Abbildung 3.2: Klimaänderungssignal (2021-2050 minus 1961-1990) der 2 m-Temperatur [K]. Links: Ensemble-Mittelwert; rechts: Ensemble-Standardabweichung

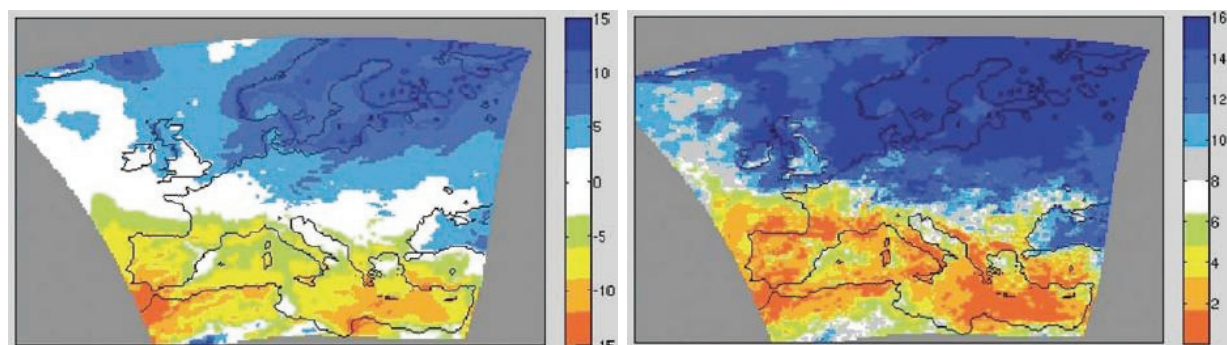


Abbildung 3.3: Klimaänderungssignal (2021-2050 minus 1961-1990) des Niederschlags [%]. Links: Ensemble-Mittelwert; Rechts: Anzahl an Regionalmodellen, die einen Niederschlagsanstieg zeigen

Die Abbildung 3.2 zeigt den Ensemble-Mittelwert der Temperaturänderung 2021-2050 gegenüber 1961-1990. Die Temperaturerhöhung verteilt sich regional unterschiedlich zwischen 1 und 2 K und ist deutlich höher als die Standardabweichung des Ensembles. Die entsprechende Niederschlagsänderung ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Im südlichen Teil Europas nehmen die Niederschläge im Jahresmittel deutlich ab und im Norden Europa deutlich zu. Darin stimmen die Ergebnisse der meisten Modelle überein (rechte Abbildung) und werden damit als robust bezeichnet. Der Verlauf des Grenzbereichs im Übergang zwischen Niederschlagsabnahme und -zunahme dagegen ist sehr unsicher, da die Modellergebnisse nicht gut übereinstimmen. Viele Ergebnisse des ENSEMBLE Projekts sind im Abschlussbericht zusammengestellt, er ist verfügbar unter http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf

3.2 Bandbreiten der Simulationsergebnisse

Die zeitlichen Verläufe der simulierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen verdeutlichen die Bandbreiten der simulierten Klimaänderungen, die sich aus den Projektionen für das A1B Szenario der 16 verschiedenen Global-/Regionalmodell-Kombinationen ergeben. In den Abbildungen 3.4 und 3.5 sind jeweils die saisonal gemittelten Änderungen im Winter (Dezember-Januar-Februar) und im Sommer (Juni-Juli-August) im Bezug zum Kontrollzeitraum 1971-2000 in gleitenden 11-Jahresmitteln (jeweils auf das 6. Jahr abgebildet) im Gebietsmittel für Deutschland gezeigt. Diese Darstellung veranschaulicht die hohe dekadische Variabilität von Temperatur und Niederschlag, die auf internen Schwankungen im Klimasystem beruht. Es zeigt sich eine Zunahme der Temperatur in allen Simulationen, die sich im Verhältnis zu den dekadischen Schwankungen der Jahrestemperatur im Verlauf des 21. Jahrhunderts immer deutlicher abhebt. Die Erwärmung im Winter fällt dabei stärker aus als im Sommer. Bei den Niederschlagsänderungen hingegen dominiert die dekadische Variabilität bis zur Mitte des Jahrhunderts, erst zum Ende des Jahrhunderts ist im Deutschlandmittel ein Trend zu höheren Niederschlägen im Winter und geringeren Niederschlägen im Sommer zu erkennen.

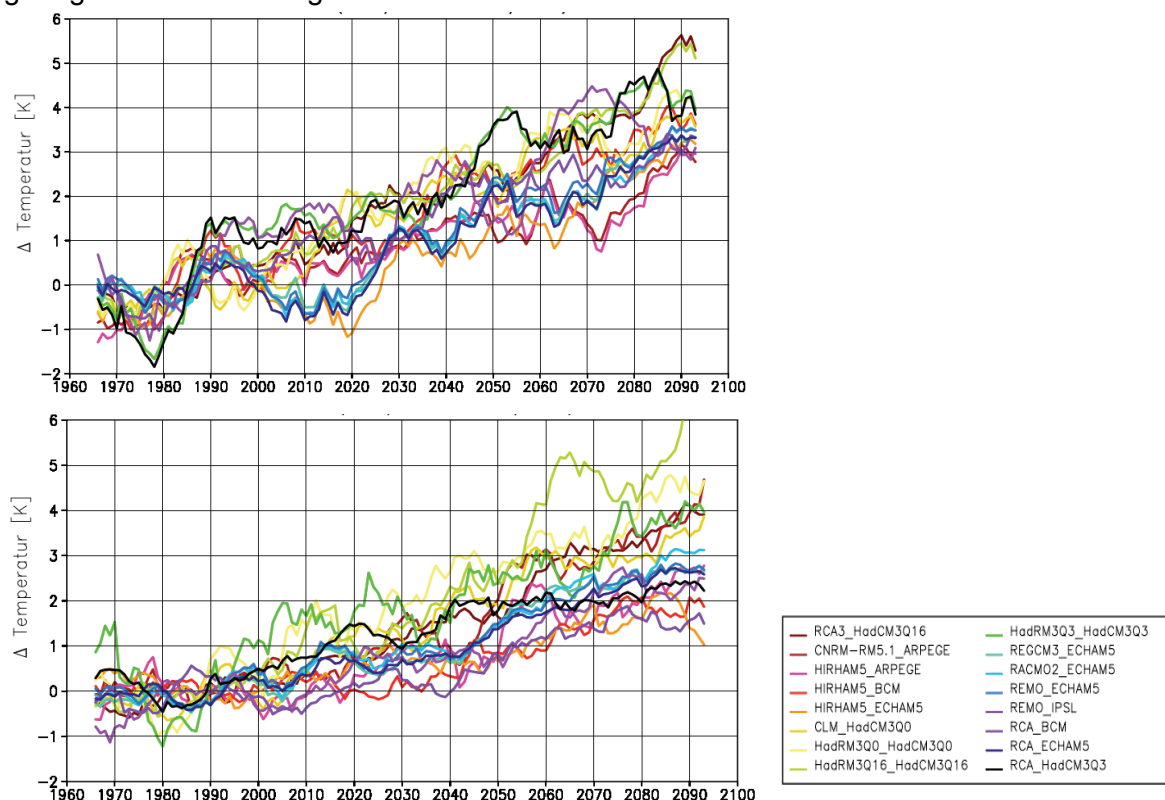


Abbildung 3.4: Projizierte Änderung der 2 m-Temperatur [K] im A1B-Szenario simuliert mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen in Winter (oben) und Sommer (unten) im Gebietsmittel Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 11-Jahresmittel)

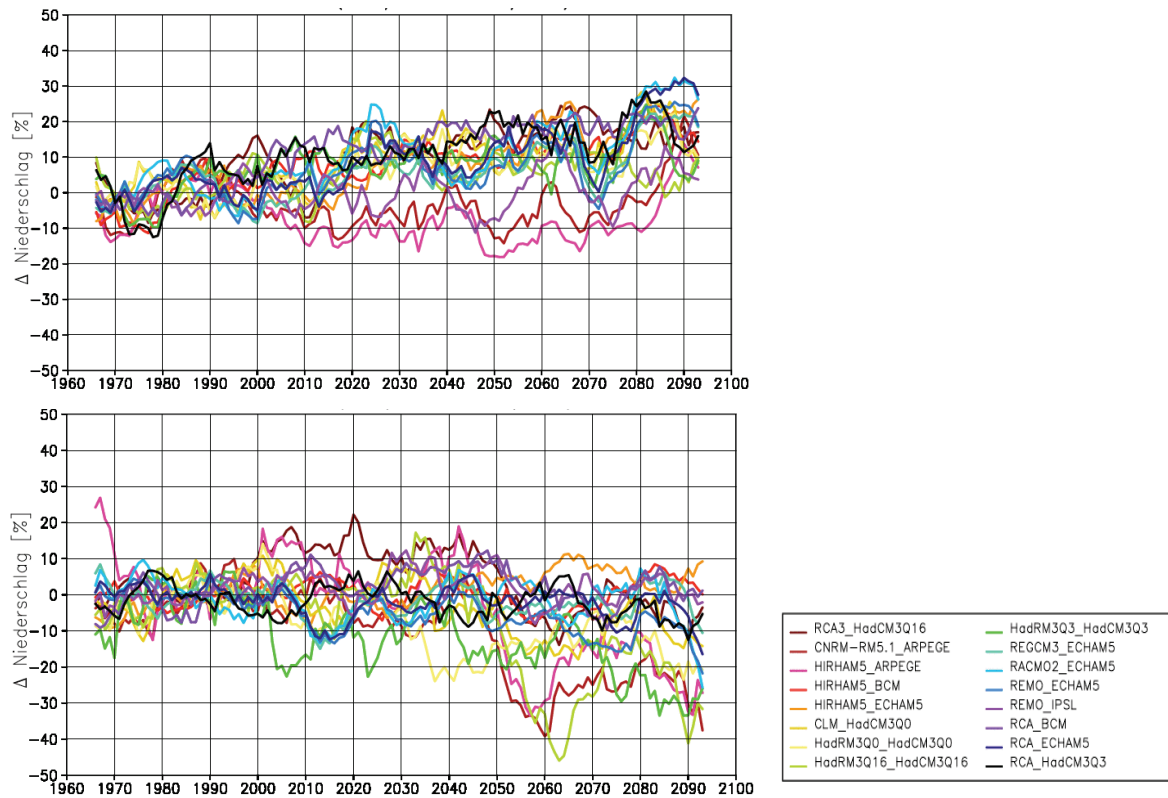


Abbildung 3.5: Projizierte Änderung des Niederschlags [%] im A1B-Szenario simuliert mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen in Winter (oben) und Sommer (unten) im Gebietsmittel Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 11-Jahresmittel)

In dem Verlauf der Zeitreihen zeigt sich weiterhin, dass die mit den regionalen Klimamodellen simulierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen stark durch die antreibenden Globalmodelle bestimmt werden. So liegen zum Beispiel die Ergebnisse der mit ECHAM5 angetriebenen Regionalmodelle RACMO, RCA, REGCM3 und REMO (in Blautönen) sehr nah zusammen. Die Simulation mit HIRHAM5, die ebenso mit ECHAM5 angetrieben wurde, hebt sich etwas von den anderen vier Simulationen ab, zeigt aber auch dekadische Schwankungen, die meist parallel zu den anderen vier Zeitreihen verlaufen. Vor allem im Winter zeigen auch die Ergebnisse des Regionalmodells HadRM3 und je eines weiteren Regionalmodells, die mit der gleichen Version des Globalmodell HadCM3 (METO-HC in Tb. 3.2) angetrieben wurden, ähnliche Verläufe (*HADCM3 Version -Q0*, „normale Klimasensitivität“: HadRM3Q0 und CLM in Gelbtönen; *HADCM3 Version -Q3*, „geringe Klimasensitivität“: HadRM3Q3 in grün und RCA in schwarz; *HADCM3 Version -Q16*, „hohe Klimasensitivität“: HadRM3Q16 in hellgrün und RCA3 in braun). Die parallelen dekadischen Schwankungen zeigen, dass die großskaligen natürlichen Schwankungen des Klimasystems, die in den globalen Klimamodellen durch die Kopplung von Atmosphäre und Ozean simuliert werden können (z. B. durch die Nordatlantische Oszillation), über den Randantrieb an die Regionalmodelle weitergegeben werden, und vor allem im Winter die Variabilität in den simulierten Zeitreihen der Temperatur- und Niederschlagsänderungen bestimmen.

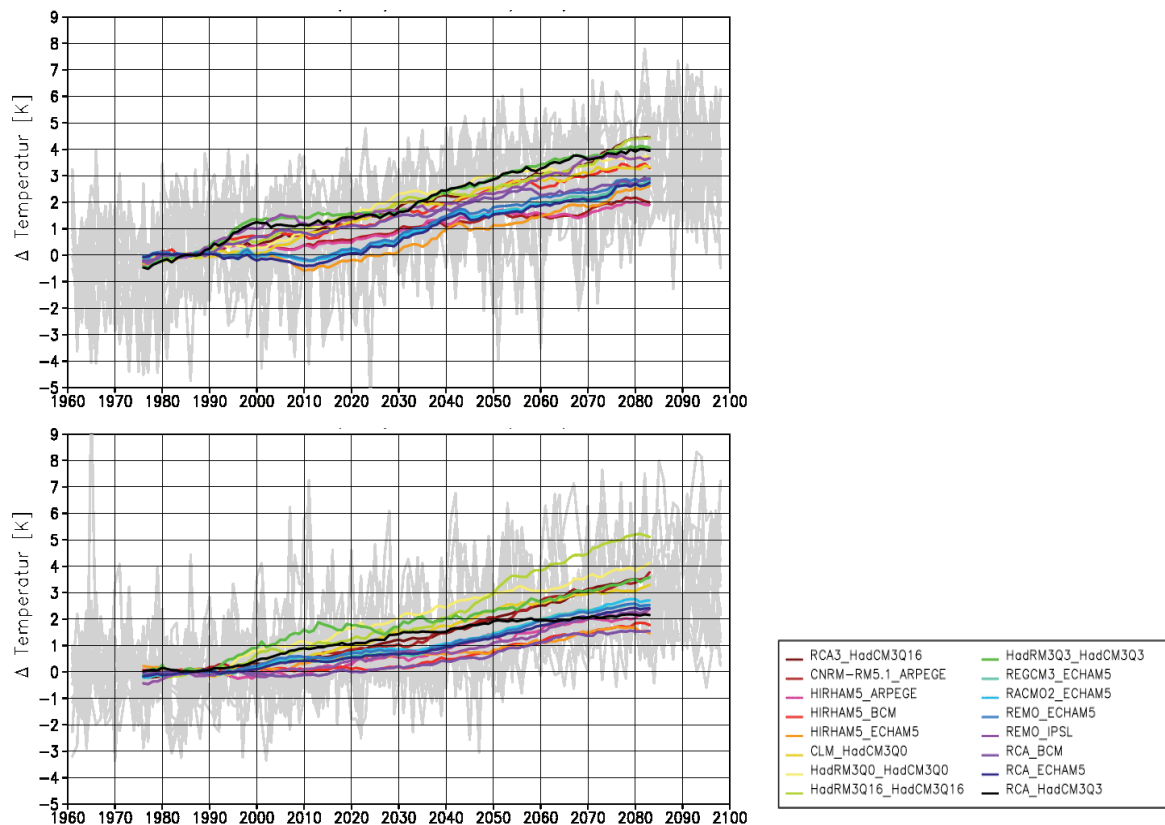


Abbildung 3.6: Projizierte Änderung der 2 m-Temperatur [K] simuliert mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen in Winter (oben) und Sommer (unten) im Gebietsmittel Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in grau die Jahreswerte aller Simulationen

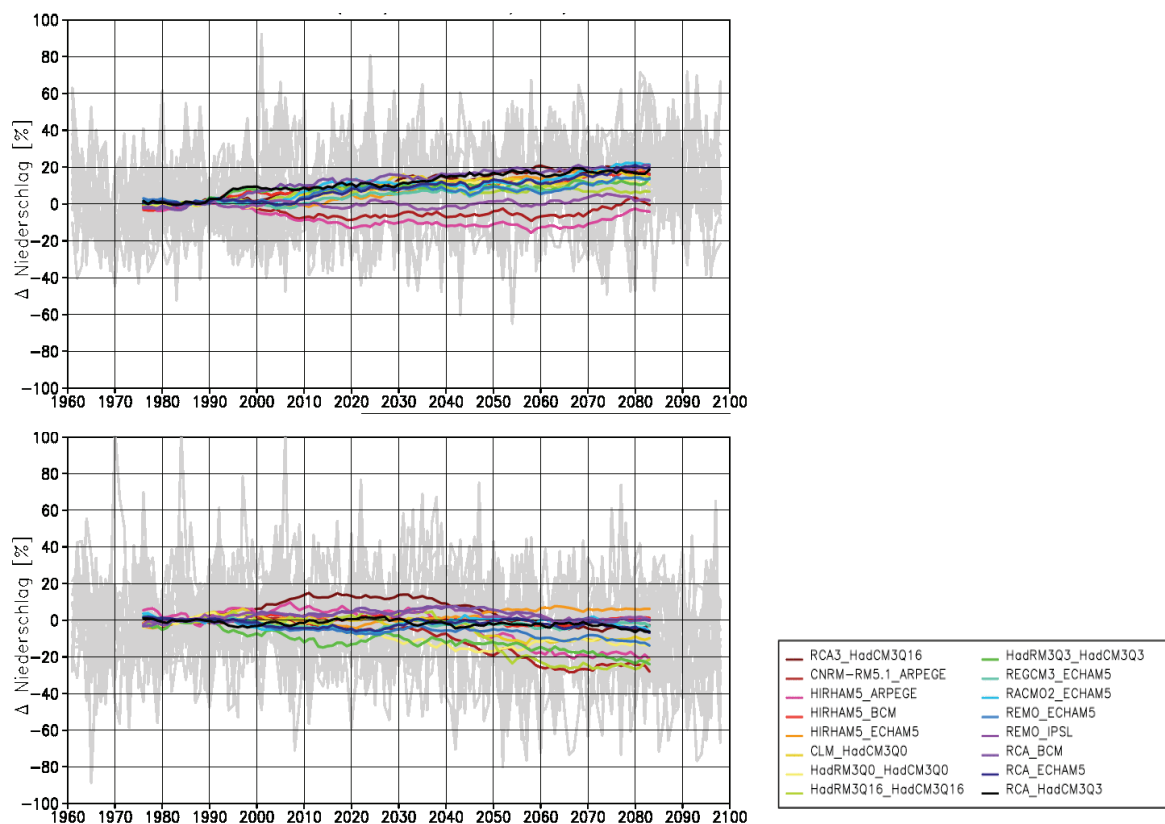


Abbildung 3.7: Projizierte Änderung des Niederschlags [%] simuliert mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen in Winter (oben) und Sommer (unten) im Gebietsmittel Deutschland relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in grau die Jahreswerte aller Simulationen

In Abbildung 3.6 und 3.7 sind für die 16 Simulationen die klimatologischen saisonalen Änderungen der 2 m-Temperatur und des Niederschlags in Deutschland im Vergleich zum Mittelwert der Referenzperiode 1971-2000 als gleitendes 31-Jahresmittel (Mittel jeweils auf das 16. Jahr abgebildet) dargestellt. Diese sind mit den einzelnen Jahreswerten aller Simulationen in grau hinterlegt, was die hohe Variabilität von Temperatur und Niederschlag von Jahr zu Jahr verdeutlicht. Zum Ende des Jahrhunderts (2070-2100) reicht die Bandbreite der Temperaturänderung im Winter von etwa 2 K bis 4.5 K; im Sommer von etwa 1.5 K bis 5 K. Insgesamt zeigen die Ergebnisse aller Modelle eine deutliche Temperaturzunahme. Bei den saisonalen Niederschlägen zeigen die Ergebnisse der meisten Modelle eine Zunahme im Winter mit einer Bandbreite von -4 % bis +20 % am Ende des Jahrhunderts. Im Sommer zeigen fast alle Modelle eine Niederschlagsabnahme mit einer Bandbreite von -25 % bis +5 % am Ende des Jahrhunderts. Diese Bandbreiten der Temperatur- und Niederschlagsänderungen ergeben sich allein aus den Simulationen des A1B Szenarios.

4 Hochaufgelöste Simulationen für Deutschland

4.1 Übersicht zu den Simulationen

Für Europa bzw. Deutschland wurden die globalen Klimaprojektionen des gekoppelten Modellsystems ECHAM5/MPI-OM (ROECKNER ET AL., 2003; JUNGCLAUS ET AL., 2006), die am MPI-M im Rahmen des vierten Sachstandsbericht (AR4) des IPCC durchgeführt wurden (MPI-M, 2006), mit mehreren Regionalmodellen dynamisch verfeinert (s. Übersicht Tabelle 4.1, zur Methodik s. Kapitel 2).

Modell	Gebiet	Auflösung	Zeitraum	Simulationen
CLM	Europa	~ 18 km	1960-2000 2001-2100	3 C20, 2 A1B, 2 B1
REMO	Europa	~ 11 km	1950-2000 2001-2100	1 C20, 1 A1B
REMO	Deutschland	~ 10 km	1950-2000 2001-2100	3 C20, 3 A1B, 3 A2, 3 B1
WETTREG	Deutschland	Stationen	1961-2000 2001-2100	C20 A1B, B1, A2
STARII	Deutschland	Stationen	2007-2060	3 A1B

Tabelle 4.1: Übersicht hochaufgelöster regionaler Klimasimulationen für Deutschland von REMO, CLM, WETTREG, STARII

Das globale Modellensemble wurde mit dem regionalen Klimamodell REMO (Modellversion REMO5.7) zunächst für Europa zu einer Auflösung von 0.44° (50 km) dynamisch verfeinert. Im zweiten Nestungsschritt (s. Abbildung 4.1) wurden am MPI-M im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) die jeweils 1. Realisierungen von C20 sowie A1B, A2 und B1 für Zentraleuropa (Deutschland, Österreich und die Schweiz) auf ein Zielgitter mit horizontaler Auflösung von 0.088° (etwa $10 \times 10 \text{ km}^2$) dynamisch weiter verfeinert (JACOB ET AL., 2008a). Die Ergebnisse wurden mit Unterstützung des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in der CERA Datenbank des World Data Center for Climate (WDCC) archiviert. Im Rahmen von KLIWAS (s. Kapitel 5) wurden im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zudem die 2. Realisierung von C20 und A1B dynamisch auf 0.088° verfeinert. Auch die Ergebnisse dieser Simulationen sind über die CERA Datenbank für die Klimafolgenforschung verfügbar. Mit der Modellversion „REMO2009 mit Niederschlagsadvektion“ - kurz REMO2009_radv - wurden im Auftrag der BfG zudem die 3. Realisierung der Simulation des A2 Szenarios regionalisiert. Im Rahmen von KLIMZUG-NORD (s. Kapitel 7) wurde das REMO-Ensemble mit der 3. Realisierung von C20 und A1B (Version REMO2008), der 2. und 3. Realisierung von B1 sowie der 2. Realisierung von A2 erweitert - jeweils mit der Modellversion REMO2009_radv. Entsprechend wurden auch die Kontrollsimulationen C20_2 und C20_3 mit REMO2009_radv nochmal berechnet, um konsistente Änderungssignale ableiten zu können. Am CSC wurde im Rahmen des EU-Projekts CLIMATE FOR CULTURE die 3. Realisierung von C20 und des A1B Szenarios im Doppelnestungsverfahren für die Horizontalauflösung 0.11° für ganz Europa regionalisiert.

Mit dem regionalen Klimamodell CLM wurden in den vom BMBF geförderten Konsortialrechnungen (HOLLWEG ET AL., 2008) mehrere Simulationen des globalen Modellsystems ECHAM5-MPIOM für Europa dynamisch verfeinert. Dabei wurde CLM für Europa mit einer Horizontalauflösung 0.165° (18km) direkt in die globalen Felder des Modellsystems ECHAM5/MPI-OM genestet: CLM-C20_1,2; CLM-A1B_1,2, CLM-B1_1,2 (LAUTENSCHLAGER ET AL., 2009; KEULER ET AL., 2009a,b,c,d,e).

Weitere Regionalisierungen wurden mit den statistischen Regionalmodellen WETTREG und STAR durchgeführt. Als Antrieb für diese regionalen Klimaprojektionen dienten ebenfalls die globalen IPCC/AR4 Klimaprojektionen des Globalmodells ECHAM5/MPIOM. Die Ergebnisse der statistischen und dynamischen Regionalisierungen wurden im Rahmen des Projekts ZWEK (s. Anhang I) vom Deutschen Wetterdienst (DWD) vergleichend gegenüber gestellt. Weitere Informationen zu den Regionalmodellen sind im Anhang I. Mit der neuen Version WETTREG2010 wurden im Auftrag des CSC mehrere Realisierungen der A2- und B1-Simulationen erstellt (KREIENKAMP ET AL., 2011).

4.2 Intra-Modellstudie mit REMO

Im Folgenden werden einige Ergebnisse einer Intra-Modellstudie mit REMO vorgestellt. Für die Simulationen mit REMO wurde die dynamische Regionalisierung in zwei Schritten, dem sogenannten Doppelnestungsverfahren vorgenommen:

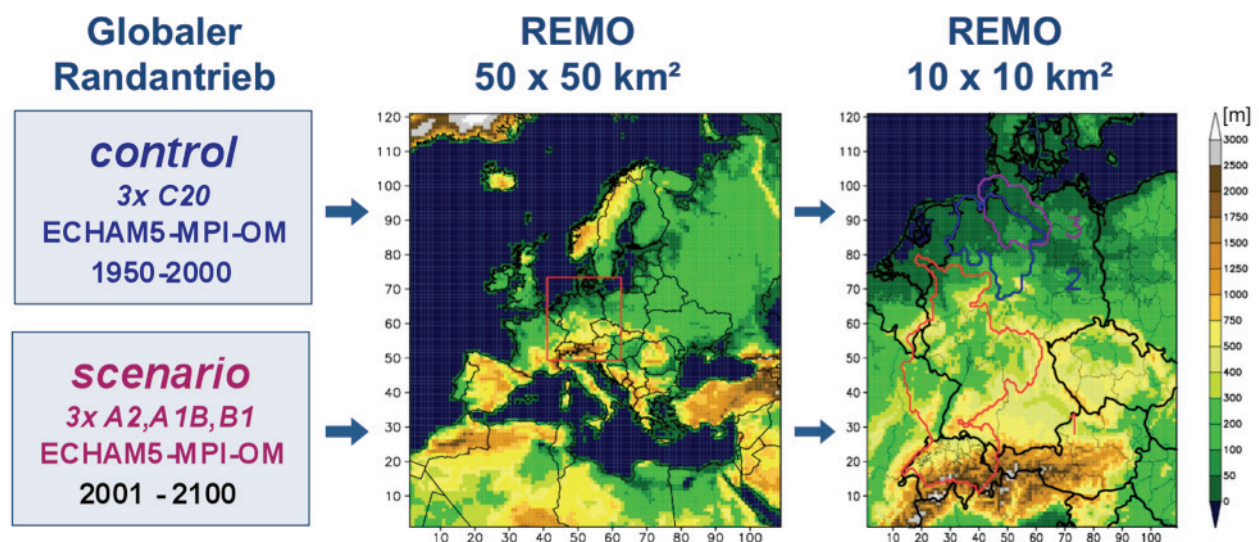


Abbildung 4.1: Dynamisches Doppelnestungsverfahren mit REMO zur Projektion möglicher Klimaänderungen für Deutschland in horizontaler Auflösung von $10 \times 10 \text{ km}^2$ im Auftrag des UBA; mit jeweils Modellgebiet/Orographie [m]; In der rechten Teilabbildung sind die Projektgebiete gezeigt, die in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden: (1) Rheineinzugsgebiet-KLIWAS, (2) Niedersachsen - KLIFF, (3) Metropolregion Hamburg - KLIMZUG-NORD

In Abbildung 4.2 sind die klimatologischen Änderungen der saisonalen Mittel von Temperatur und Niederschlag zum Ende des 21. Jahrhunderts beispielhaft für die 1. Realisierung der A1B Simulation für das gesamte Modellgebiet dargestellt. In diesem Fall kann die Temperatur in Deutschland im Vergleich zur Klimaperiode 1971-2000 im Sommer um 2 K im Norden und bis mehr als 4 K im Alpenraum ansteigen. Im Winter fällt die Erwärmung deutlich stärker aus, sie liegt vor allem im Süden und Osten über 4 K. Im Sommer zeigen die Projektionen in weiten Teilen Deutschlands abnehmende Niederschlagsmengen, während sie im Winter zunehmen.

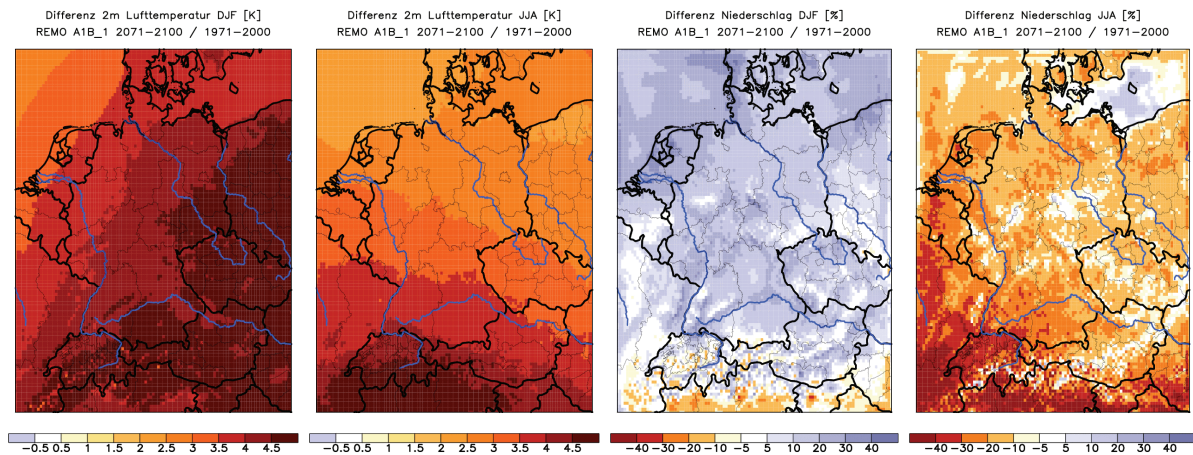


Abbildung 4.2: Mittlere saisonale Änderung der 2 m-Temperatur [K] (links) und relative Änderung des saisonalen Niederschlags [%] (rechts) der REMO-A1B_1 Projektion 2071-2100 im Vergleich zur Kontrollperiode C20_1 1971-2000

Die Bandbreiten der saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen, die sich aus den Ergebnissen des gesamten REMO-Ensembles ergeben, sind in den Abbildungen 4.3 und 4.4 dargestellt. Die simulierten saisonalen Änderungen in Deutschland sind im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 als gleitendes 31-Jahresmittel dargestellt. Diese sind mit den einzelnen Jahreswerten aller Simulationen in grau hinterlegt. Die winterliche Temperatur zeigt eine deutlich höhere interanuelle Variabilität als die Temperatur im Sommer. In allen Simulationen nimmt die mittlere Temperatur deutlich zu. Die Erwärmung im Winter mit 2.4 K bis 4.3 K zum Ende des 21. Jahrhunderts (2070-2100) fällt stärker aus als im Sommer mit 1.3 K bis 3.1 K im Gebietsmittel für Deutschland. Im Winter fällt auf, dass die Temperaturänderungen jeweils der 3. Realisierung der Szenarien A2 und A1B näher mit den verschiedenen Realisierungen des B1 Szenarios zusammen liegen. Das liegt an der höheren Mitteltemperatur 1971-2000 in der 3. Realisierung im Kontrollklima (C20_3). Auch die Zeitreihen der Niederschlagsänderungen weisen eine hohe interanuelle Variabilität auf, die im Winter größer ist, als im Sommer. Alle Simulationen zeigen zum Ende des Jahrhunderts (2070-2100) eine Zunahme des Niederschlags im Winter mit einer Bandbreite von 10 % bis 30 %. Im Sommer liegt die Bandbreite zwischen -18 % und +10 %, wobei die meisten Simulationen eine Niederschlagsabnahme zeigen.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus ENSEMBLES (vgl. Kapitel 3) wird hier folgendes deutlich: Für das Gebietsmittel Deutschland ist die Bandbreite der im A1B Szenario simulierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen unter Verwendung verschiedener Global-/Regional-Modellkombinationen größer als die Bandbreite, die sich aus den Simulationen von REMO (angetrieben mit ECHAM5/MPI-OM) für alle drei Szenarien B1, A1B und A2 ergeben. Dieser Vergleich zeigt die Notwendigkeit des Multi-Modell-Ansatzes, um die gesamte Bandbreite möglicher Klimaänderungen zu erfassen.

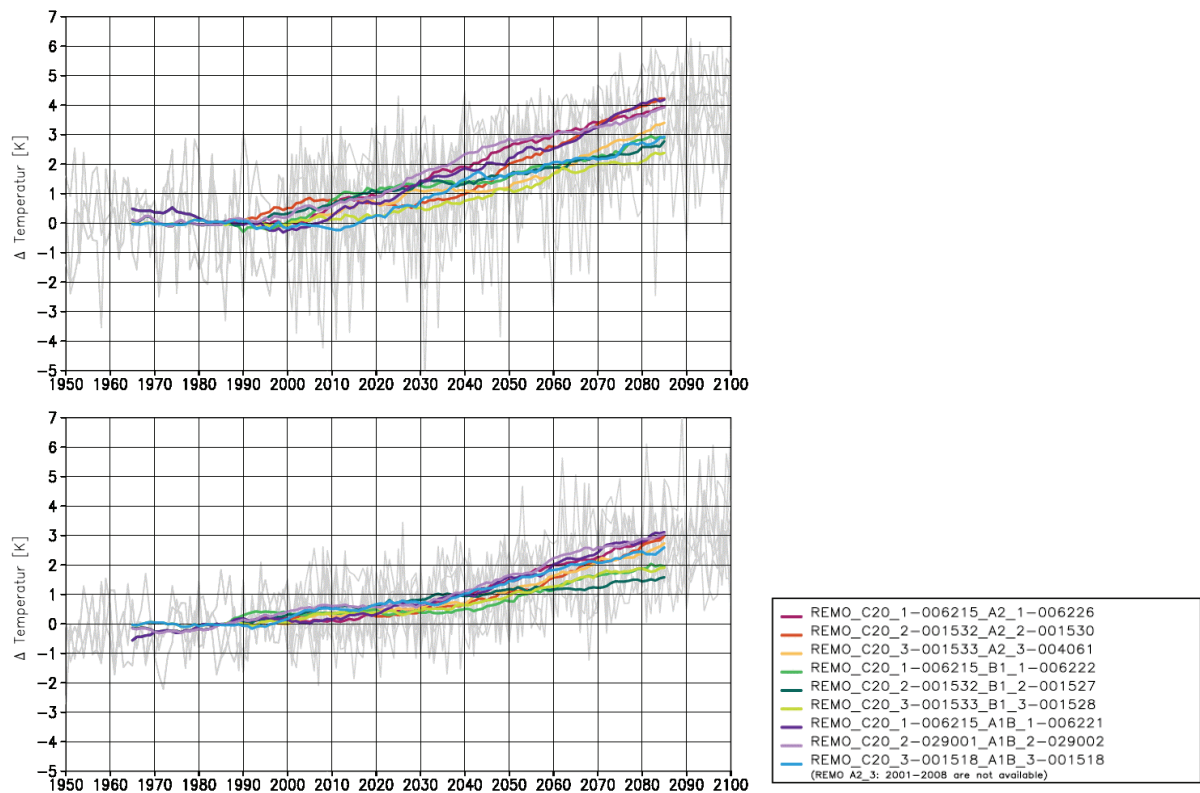


Abbildung 4.3: Projizierte Änderung der 2 m-Temperatur [K] simuliert mit 9 REMO Projektionen in Winter (oben) und Sommer (unten) für Deutschland relativ zu 1971–2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in Grau die Jahreswerte aller Simulationen

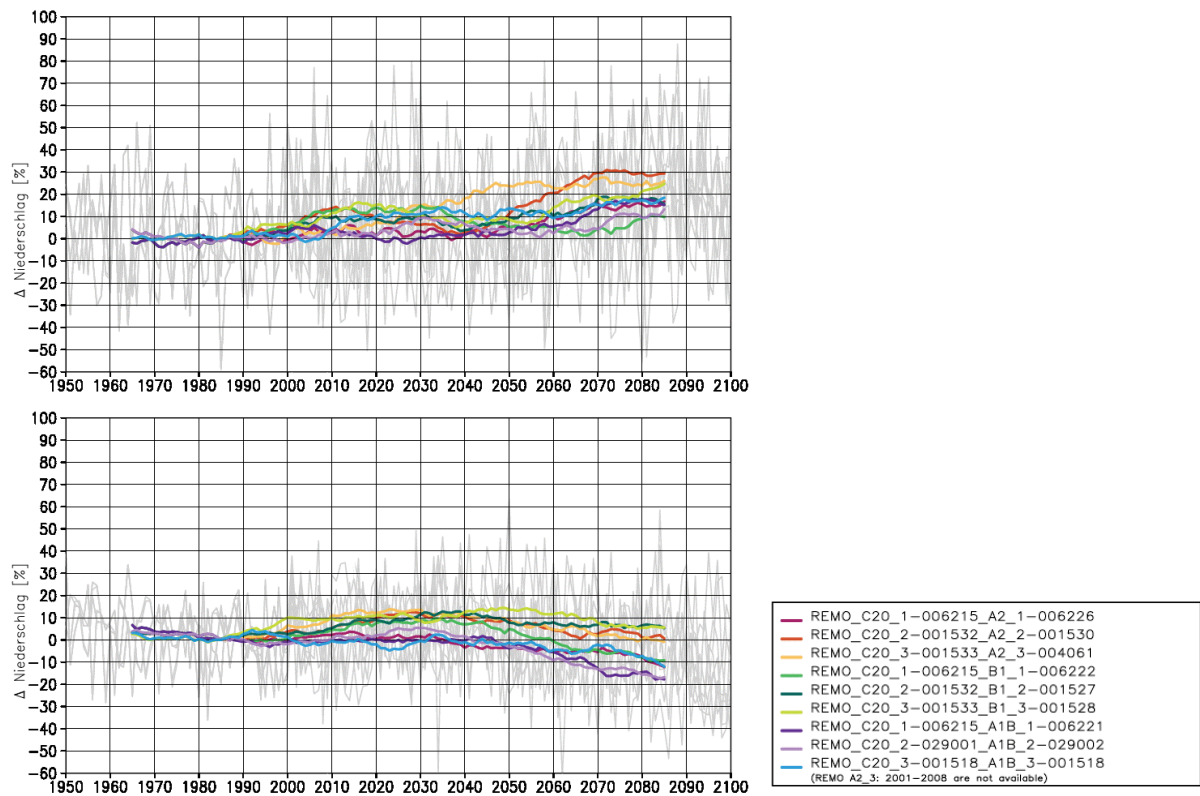


Abbildung 4.4: Projizierte Änderung des Niederschlags [%] simuliert mit 9 REMO Projektionen im Winter (oben) und im Sommer (unten) für Deutschland relativ zu 1971–2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in Grau die Jahreswerte aller Simulationen

4.3 Evaluierung der Modellsimulationen

Um einschätzen zu können, ob Klimamodelle in der Lage sind, das heutige Klima in einer bestimmten Region (hier Deutschland) zu reproduzieren, werden die simulierten Klimamittel (mindestens über 30 Jahre gemittelt) verschiedener Parameter mit den beobachteten Klimamitteln verglichen. Dieser Vergleich wird hier als Evaluierung bezeichnet, im Gegensatz zur Validierung von regionalen Klimasimulationen, die mit Reanalysedaten (mit 3D-Modell reprozessierte Atmosphärendaten unter Einbezug von Beobachtungen) am Rand des Modellgebietes angetrieben wurden. Diese Simulationen können auch auf kürzeren Zeitskalen mit Beobachtungen verglichen werden.

Im Prinzip ist es zu empfehlen direkte Stationsmessdaten heranzuziehen, damit die Beobachtungsdatensätze nicht verfälscht werden. Dynamische Klimamodelle wie REMO und CLM arbeiten jedoch mit Gitterboxen, die durch auf die Erdoberfläche projizierte Flächen beschrieben werden. Obwohl die Position der Gitterboxen üblicherweise auf ihrem Mittelpunkt angegeben wird, sind die auf ihnen angegebenen Klimavariablen als Mittelwerte über die gesamte Fläche der jeweiligen Gitterbox zu verstehen. Auch die für jede Gitterbox angegebene Höhe über NN ist ein Flächenmittel. Der Vergleich von Beobachtungen an einer Messstation mit den Simulationsergebnissen der Gitterbox, in der die gegebene Station liegt, ist problematisch, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Bedingungen an der Station wirklich als repräsentativ für die gesamte Gitterbox gelten können, selbst wenn die Simulationen eine relativ hohe horizontale Auflösung von 10 km x 10 km besitzt. Insbesondere ist zu beachten, dass die tatsächliche Höhe einer Messstation sich von dem Flächenmittel der jeweiligen Gitterbox unterscheiden kann, weshalb für einige Größen, z.B. die Lufttemperatur, Höhenkorrekturen erforderlich sind. Deshalb werden zur Evaluierung dynamischer Klimamodelle oft Beobachtungsdatensätze verwendet, die auf ein Gitter interpoliert sind. Die Güte dieser Datensätze hängt stark von der verwendeten Interpolationsmethode, der Auflösung des Gitters, sowie der Stationsdichte der Daten, die in die Interpolation eingehen, ab.

In Abbildung 4.5 ist ein Vergleich der von REMO und CLM simulierten 40-Jahres-Mittelwerte der klimatologischen Jahresgänge der bodennahen Lufttemperatur und des Niederschlags für Deutschland mit verschiedenen Datensätzen dargestellt. Es handelt sich um Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (REGNIE, DWD 2011), die auf einem Gitter mit der horizontalen Auflösung von ca. 1 km x 1 km vorliegen, den ENSEMBLES-Projekt Datensatz (E-OBS; Auflösung ca. 25 km; s. HAYLOCK ET AL., 2008), und den „Climate Research Unit“ Datensatz (CRU; Auflösung 0.5°; s. MITCHELL, JONES, 2005). Bei den simulierten klimatologischen Jahresgängen handelt es sich jeweils um das mittlere Ergebnis aus den drei Realisierungen der Kontrollsimulation. Liegen die Simulationsergebnisse außerhalb des angenommenen Fehlerbereichs der Beobachtungsdatensätze, spricht man von einem systematischen Modellfehler (s. auch Kapitel 2). Die Größe dieser Abweichung ist der „Bias“.

Für die Temperatur liegen die Beobachtungsdatensätze eng zusammen. Während die von CLM simulierte Temperatur unterhalb der Beobachtungsdaten liegt, am stärksten im Sommer und weniger stark im Winter, liegt die Temperatur von REMO mit Ausnahme des Sommers oberhalb der Beobachtungen. Beim Niederschlag ist dagegen eine deutliche Differenz zwischen den Beobachtungsdatensätzen zu sehen: Während E-OBS und CRU relativ nahe zusammen liegen, zeigt der REGNIE-Datensatz des DWD deutlich höhere Werte. Gründe hierfür sind u. a. die unterschiedliche Anzahl berücksichtigter Beobachtungsstationen und abweichende Methoden für die Niederschlagskorrektur (Richter-Korrektur). Der REGNIE-Datensatz ist vermutlich für Deutschland der verlässlichste, da für ihn alle DWD-Stationen zur Verfügung standen. Die Abweichungen der Datensätze untereinander unterstreichen die Schwierigkeit einer Modellevaluierung, da keine absolut verlässlichen Daten vorliegen.

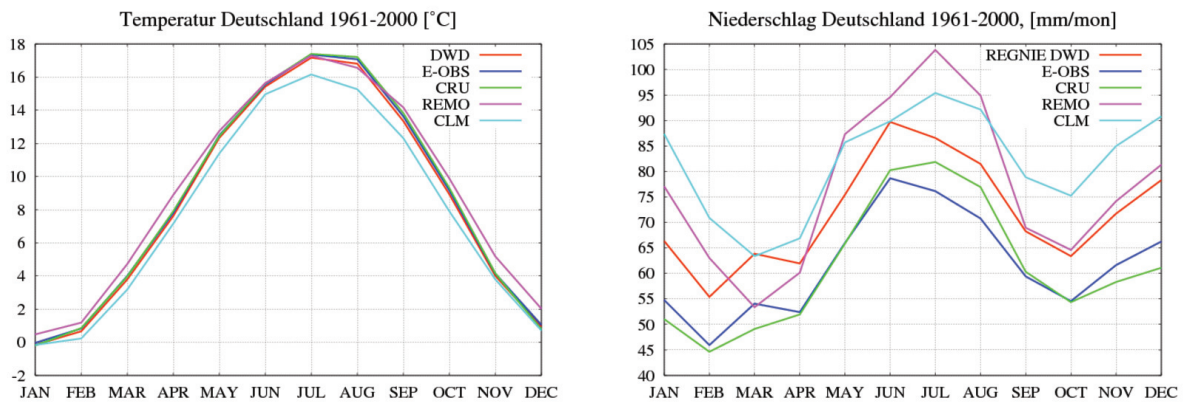


Abbildung 4.5: Jahreszyklen von Temperatur [°C] (links) und Niederschlag [mm/Monat] (rechts) dreier verschiedener Beobachtungsdatensätze sowie der regionalen Klimamodelle REMO und CLM, gemittelt über Deutschland

Beide Modelle überschätzen den Niederschlag gegenüber allen drei Beobachtungsdatensätzen. Während CLM ganzjährig zu hohen Niederschlag simuliert, ist der von REMO simulierte Niederschlag vor allem in den Sommer- und Wintermonaten zu hoch, während er in den Übergangsjahreszeiten relativ nahe an dem REGNIE-Datensatz liegt.

Die horizontalen Verteilungen des Temperatur- und Niederschlagsbias von REMO und CLM sind in den Abbildungen 4.6 und 4.7 dargestellt. Für diesen Vergleich wurden die Datensätze des DWD herangezogen, da sie im Vergleich zu E-OBS und CRU die höchste horizontale Auflösung haben. Es lässt sich erkennen, dass der Warm-Bias von REMO in Süddeutschland stärker ist als im Norden. Nur im Sommer ist REMO östlich der Elbe eher zu kühl, während im Süden ein leichter Warm-Bias erhalten bleibt. Der Kalt-Bias von CLM ist im Norden stärker als im Süden. Nur im Winter simuliert CLM in Süddeutschland eine etwas zu hohe Temperatur. Regionale Unterschiede finden sich auch in der Verteilung des Niederschlags-Bias. Tendenziell ist REMO im Norden zu feucht und im Süden zu trocken. Die größte Überschätzung des Niederschlags ist an den Küsten zu erkennen. CLM simuliert vor allem im Osten Deutschlands zu viel Niederschlag. Einen vergleichbaren Nord-Süd-Gegensatz wie bei REMO zeigen die CLM-Simulationen nur im Sommer.

Es hat sich herausgestellt, dass manche Impakt-Modelle, die regionale Klimamodelldaten als Eingangsgrößen verwenden, sehr empfindlich auf systematische Abweichungen zwischen dem simulierten und dem tatsächlich beobachteten Klima – auf dessen Basis sie kalibriert und validiert werden – reagieren. Die Folge ist, dass unter Umständen auf der Grundlage von Klimamodelldaten mit systematischen Abweichungen mit diesen Impakt-Modellen keine sinnvollen Klimafolgenstudien durchgeführt werden können. Eine mögliche Lösung ist die Erzeugung bias-korrigierter Klimamodelldaten. Eine Bias-Korrektur ist eine Methode, die eine oder mehrere Variablen einer Klimasimulation systematisch so verändert, dass sie der Statistik eines Beobachtungsdatensatzes angepasst wird. Die bei der Bias-Korrektur verwendeten Ansätze beruhen auf der Analyse von Klimadaten aus der Vergangenheit und sind in ihrer Übertragbarkeit auf die Zukunft, in ihrer Methodik sowie in ihrer Auswirkung auf die Konsistenz und Unschärfe der erzeugten Eingaben für Impaktmodelle nur in Ansätzen erforscht. Die Qualität der Bias-Korrektur hängt von der Qualität des eingehenden Beobachtungsdatensatzes und der Bias-Korrektur-Methode ab. Ein wesentliches Problem von Bias-Korrektur-Methoden ist der mögliche Verlust der modellinternen Konsistenz der physikalischen Klimamodelle: Die Korrelationen zwischen den berechneten Klimavariablen können durch die Bias-Korrektur verändert werden.

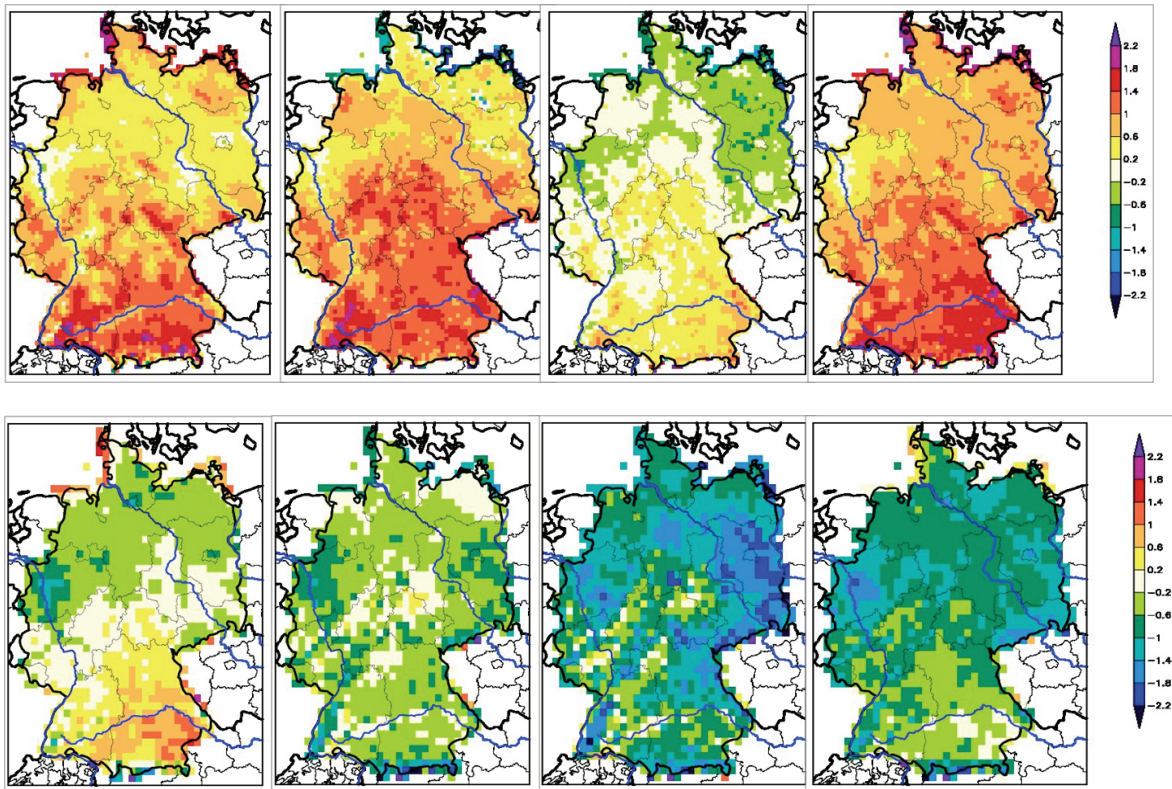


Abbildung 4.6: Bias der 2 m-Temperatur [°C] für das Mittel aus der 1. bis 3. Realisierung von REMO (oben) und CLM (unten) für den Zeitraum 1961-2000, gegen Beobachtungsdaten des DWD. Jahreszeitenmittel von links nach rechts: DJF, MAM, JJA, SON

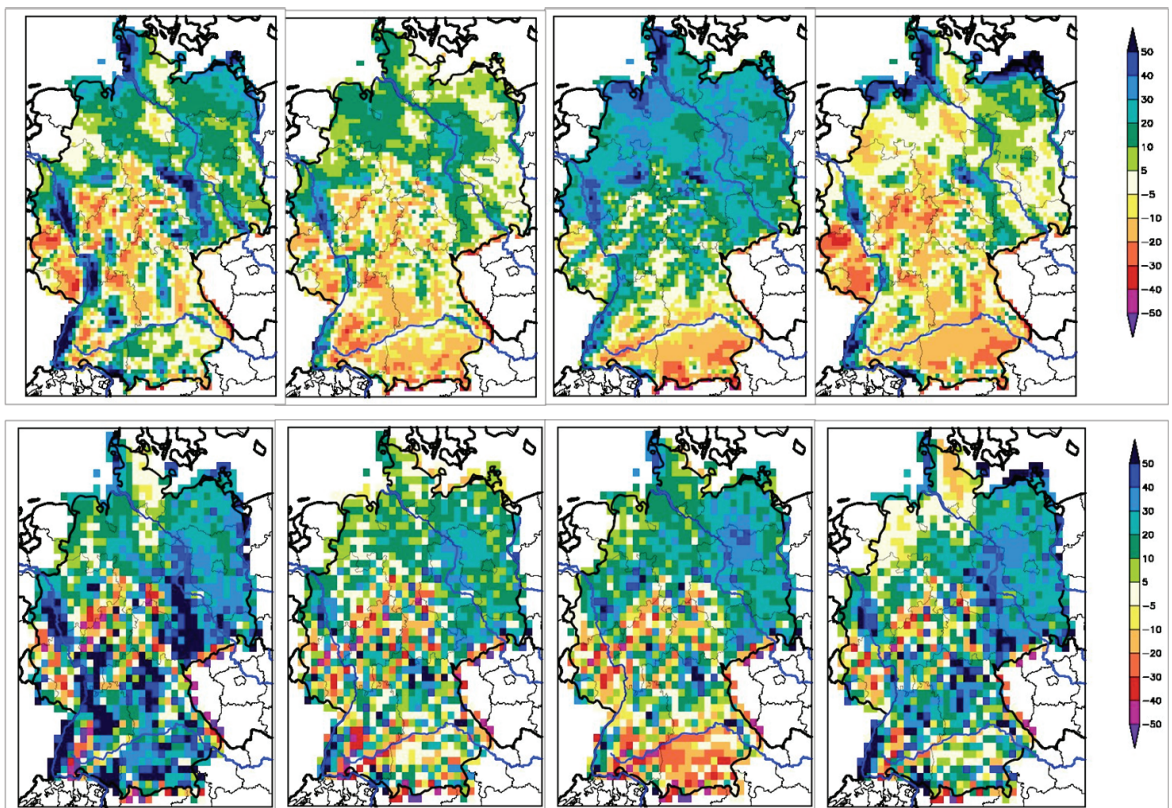


Abbildung 4.7: Bias des Niederschlags [%] für das Mittel aus der 1. bis 3. Realisierung von REMO (oben) und CLM (unten) für den Zeitraum 1961-2000, gegen Beobachtungsdaten des DWD. Jahreszeitenmittel von links nach rechts: DJF, MAM, JJA, SON

In Abschnitt 6.2 wird eine Bias-Korrektur-Methode vorgestellt, die für das Projekt KLIF verwendet wurde. Die Korrektur wurde für alle Simulationen getrennt durchgeführt, da die einzelnen Simulationen des Ensembles zum Teil mit unterschiedlichen Modellversionen durchgeführt wurden, deren Bias sich voneinander unterscheiden kann. In Abbildung 4.8 ist zu sehen, welchen Effekt die Bias-Korrektur auf den 40-Jahres-Mittelwert des Niederschlags in Deutschland hat. Links ist das Jahresmittel des Bias einer REMO-Simulation gegenüber REGNIE dargestellt. Nach der Bias-Korrektur sind die Abweichungen zum Beobachtungsdatensatz (links) wesentlich kleiner (obwohl sie nicht vollständig verschwinden), weil dieser auch zur Konstruktion des bias-korrigierten Niederschlags herangezogen wurde.

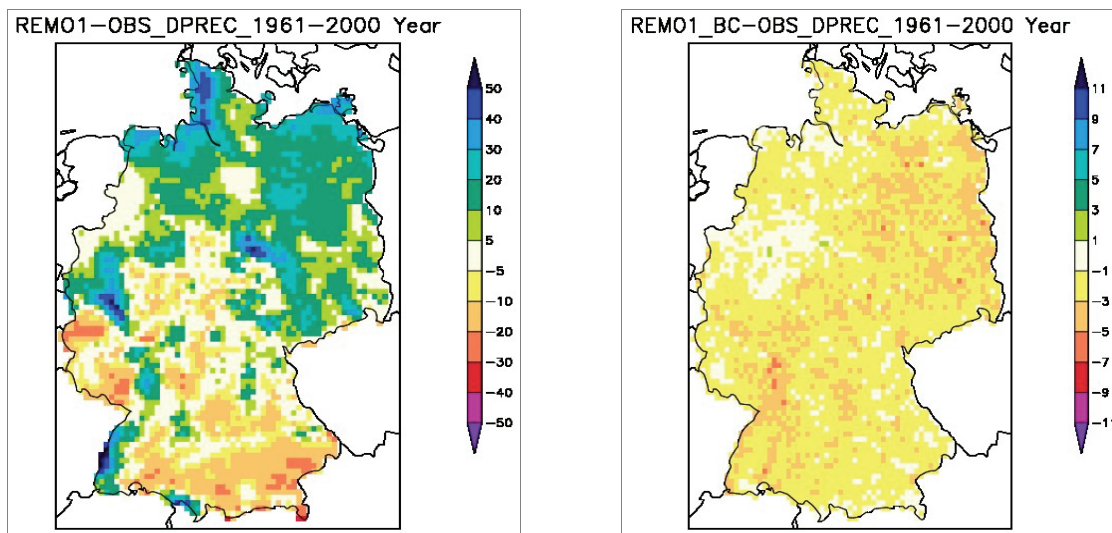


Abbildung 4.8: Bias des Niederschlags [%] im Jahresmittel für die erste REMO-Realisierung für den Zeitraum 1961-2000, gegen Beobachtungsdaten des DWD. Links: Original REMO-Niederschlag. Rechts: REMO-Niederschlag nach Bias-Korrektur (man beachte die feiner aufgelöste Farbskala!)

Die hier beschriebene Evaluierung der simulierten Monatsmittelwerte von Temperatur und Monatssummen des Niederschlags stellt einen ersten qualitativen Ansatz dar, um die Fähigkeit der Modelle zu überprüfen, das beobachtete Klima der Gegenwart reproduzieren zu können. Um eine ausführlichere Modellevaluierung durchzuführen, ist es zusätzlich empfehlenswert, auch die statistischen Verteilungsfunktionen der simulierten Größen, sowie die Korrelationen verschiedener simulierter Größen zueinander mit Beobachtungen zu vergleichen. Zudem wurden auch Güteindizes (engl. „*skill scores*“) eingeführt, um die Güte mehrerer Klimamodelle in einem Gebiet, bzw. eines Klimamodells in unterschiedlichen Gebieten zu quantifizieren. Zur Evaluierung der Simulationsergebnisse von CLM und REMO wurden diese im Rahmen verschiedener Projekte angewandt (z. B. KEULER, 2006).

Es ist zu beachten, dass der Bias einer regionalen Klimasimulation nicht allein durch das Regionalmodell (hier REMO und CLM), sondern auch durch das antreibende Globalmodell (hier ECHAM5/MPI-OM) wesentlich mit beeinflusst wird. Eine Modellevaluierung mit Reanalysedaten oder mit Kontrollsimulationen anderer globaler Klimamodelle kann deutlich andere Abweichungen von den Referenzdaten ergeben.

5 Rheineinzugsgebiet

5.1 Das Projekt KLIWAS

Im Rahmen des Ressortforschungsprogramms KLIWAS des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS; s. Anhang II) werden im Vorhaben 4 unter Federführung der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) mögliche Folgen des Klimawandels für die Gewässer und die Schifffahrt abgeschätzt. Dazu werden zunächst Szenarien entwickelt, die mögliche Klimaänderungen und daraus folgende veränderte Abflüsse, Sedimentfrachten und veränderte Gerinnemorphologien umfassen. Ziel dieser Arbeiten ist es, die Bandbreite möglicher zukünftiger (kritischer) hydraulisch/morphologischer Verhältnisse im Vergleich zu heute abzuschätzen. Ferner wird die Anfälligkeit der Betroffenen gegenüber veränderten hydraulisch/morphologischen Verhältnissen ermittelt. Betroffen sind vor allem die Binnenschifffahrt, die verladende Wirtschaft und die für den Betrieb, Unterhalt und Ausbau der Bundeswasserstraßen zuständige Wasser- und Schifffahrtsverwaltung. Schließlich werden investive oder operative Handlungsoptionen abgeleitet und analysiert. Dies können beispielsweise wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Maßnahmen sein, innovative Schiffsleitsysteme, Flottenstrukturanpassungen oder Verkehrsträgerwechsel.

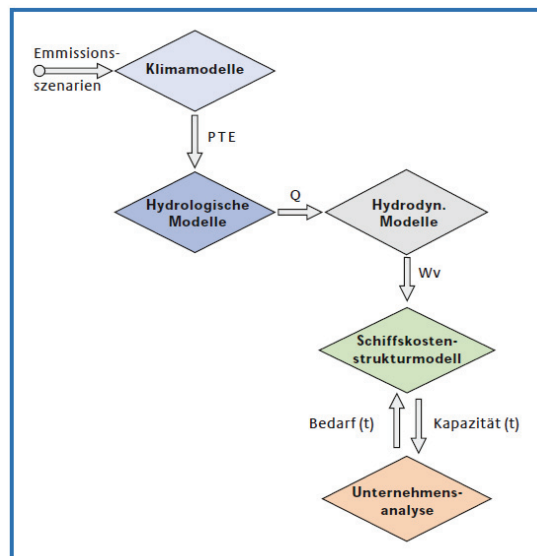


Abbildung 5.1: Modellkette des KLIWAS-Projekts „Hydrologie und Binnenschifffahrt“ Quelle: Enno Nilson, KLIWAS Tagungsband, Bonn, März 2009

Die in KLIWAS verwendete Modellkette ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Am Beginn der Modellkette stehen die Treibhausgasemissions- und -konzentrationsszenarien, unter deren Annahme globale und daran gekoppelte regionale Klimamodelle meteorologische Daten projizieren; unter anderem „hydrometeorologische Daten“ (Temperatur, Niederschlag und verdunstungsrelevante Größen), die Eingang in hydrologische Modelle finden. Die Ergebnisse der hydrologischen Modelle werden an hydrodynamische Modelle, die das Abflussgeschehen in einem Gewässer simulieren, weitergegeben und deren Ergebnisse wiederum an ein Schiffskostenstrukturmodell. Die Ergebnisse des Schiffskostenstrukturmodells stehen in Wechselwirkung mit einem Unternehmensanalysemodell.

5.2 Einfluss der Globalmodelle

Zur Erfassung des möglichen Spektrums der künftigen Klimaänderungen im Rheineinzugsgebiet werden verschiedene regionale Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert untersucht. Die Simulationen des A1B Szenarios der verschiedenen Global-/Regionalmodell-Kombinationen aus dem ENSEMBLES Projekt gehen in die Analyse ein (Kapitel 3). Durch

die Klimaprojektionen der regionalen Klimamodelle CLM und REMO werden die Simulationen erweitert.

Die Klimaprojektionen des A1B Emissionsszenarios der folgenden drei globalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen werden zur Untersuchung herangezogen: BCM (ARPEGE/MICOM), ECHAM5 (ECHAM5/MPIOM) und die drei HadCM3-Versionen (Version 1 -Q0, „normale Klimasensitivität“; Version 2 -Q3, „geringe Klimasensitivität“, Version 3 -Q16, „hohe Klimasensitivität“). Die Ergebnisse eines globalen Klimamodells dienen als Antrieb für ein oder mehrere regionale Klimamodelle.

In KLIWAS wird die Größe des Anteils der globalen Klimamodelle und der unterschiedlichen Emissionsszenarien an der Bandbreite der regionalen Klimaprojektionen untersucht. Die Bandbreite der regionalen Klimaprojektionen wird anhand eines Wertekatalogs ausgewertet, der speziell auf Niedrigwassersituationen des Rheins ausgerichtet ist. Hier werden die Ergebnisse von acht Klimaprojektionen des 21. Jahrhunderts für das A1B Szenario des Rheineinzugsgebiets untersucht.

In Abbildung 5.2 ist die Temperaturänderung bis 2100 als Differenz der jährlichen bzw. saisonalen Temperatur im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 als gleitendes 10-Jahresmittel dargestellt. Die Bandbreite der jährlichen Temperaturänderung im 10-Jahresmittel der Modellsimulationen liegt bei 1.5 K bis 2050 und nimmt bis 2100 auf 3 K zu. Die Bandbreite der jährlichen Temperaturänderung ist ab 2050 im Winter mit 2 K geringer als im Sommer mit 3 K (Abbildung 5.3).

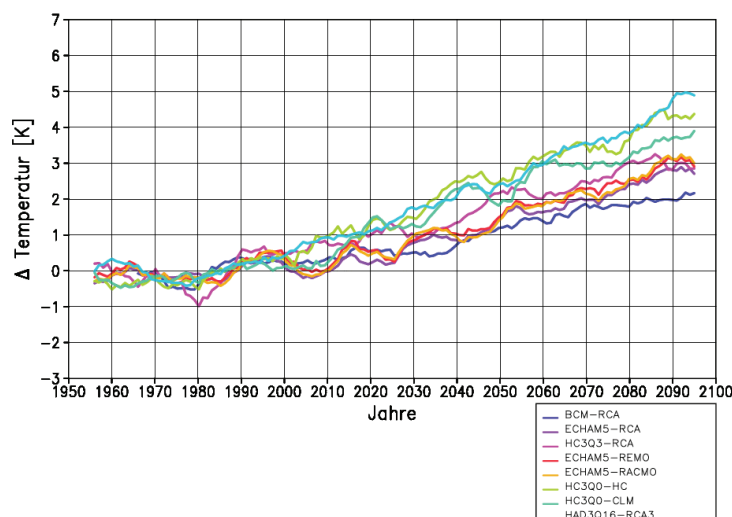


Abbildung 5.2: Änderung der Jahresmitteltemperatur [K] in 2 m Höhe für das Rheineinzugsgebiet relativ zum Mittel der Jahre 1971-2000, gleitendes 10-Jahresmittel

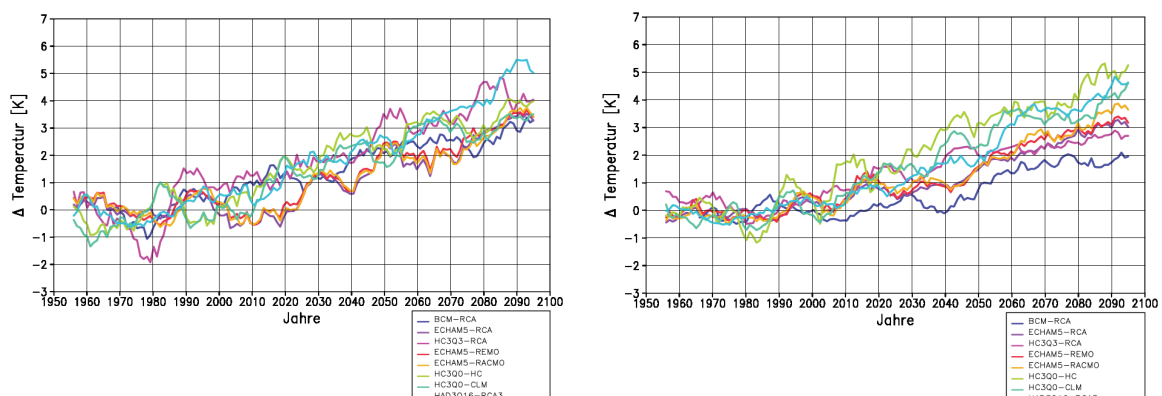


Abbildung 5.3: Änderung der mittleren Temperaturen [K] in 2 m Höhe; im Winter (DJF; links) und Sommer (JJA; rechts) für das Rheineinzugsgebiet relativ zum Mittel der jeweiligen Jahreszeiten der Jahre 1971-2000, gleitendes 10-Jahresmittel

Abbildung 5.4 zeigt die prozentuale Niederschlagsänderung bis 2100 pro Jahr und Saison im Verhältnis zum Zeitraum 1971-2000 als gleitendes 10-Jahresmittel. Der mittlere Jahresniederschlag weist keine deutliche Änderung auf, die dekadische Klimavariabilität dominiert die Niederschlagsschwankungen, die Bandbreite der dekadischen Mittel reicht von etwa -10 % bis +10 %. Im Winter ist in den meisten Modellsimulationen ab 2020 eine Zunahme des Niederschlags zu erkennen mit einer Bandbreite von etwa 30 %. Im Sommer wird für die meisten Modellsimulationen ab 2050 eine Niederschlagsabnahme festgestellt, mit einer Bandbreite der dekadischen Mittel von ebenfalls etwa 30 % (Abbildung 5.5).

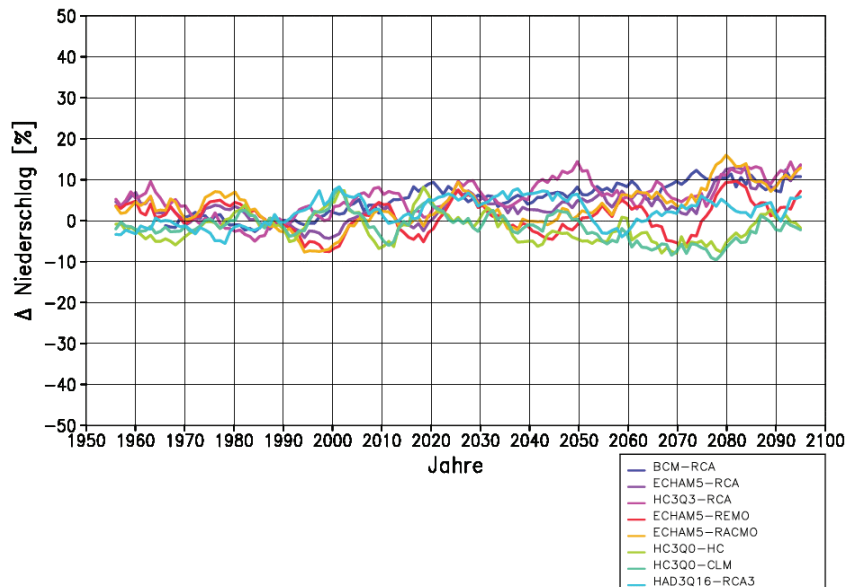


Abbildung 5.4: Änderung des mittleren Jahresniederschlags [%] für das Rheineinzugsgebiet relativ zum Mittel der Jahre 1971- 2000, gleitendes 10-Jahresmittel

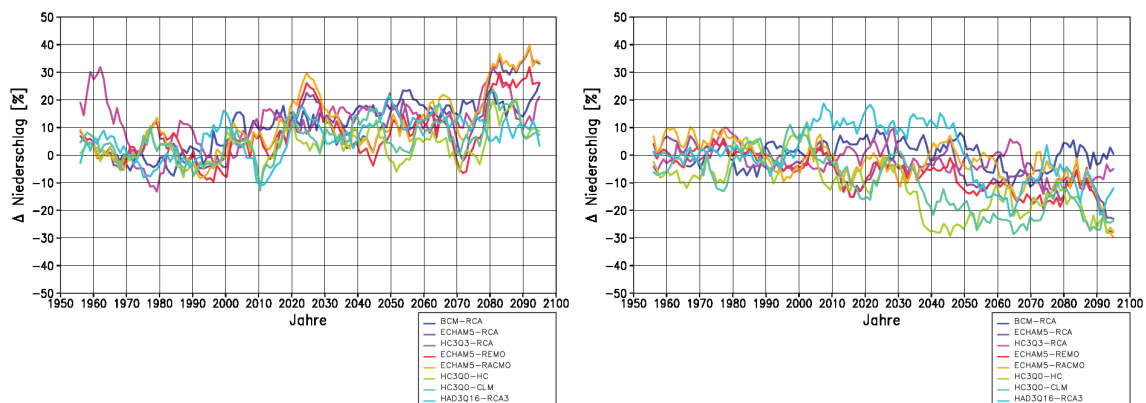


Abbildung 5.5: Änderung des mittleren Niederschlags [%] im Winter (Dezember bis Februar; links) und Sommer (Juni bis August, rechts) für das Rheineinzugsgebiet relativ zum Mittel der Jahre 1971- 2000 für die Jahreszeit, gleitendes 10-Jahresmittel

An den dargestellten Beispielergebnissen zeigt sich, dass die Bandbreiten der Klimaänderungen von den antreibenden Globalmodellen dominiert werden. Bei den Niederschlagsänderungen ist die Bandbreite der 10-Jahresmittel über den gesamten betrachteten Zeitraum etwa gleich groß. Sie wird stark durch die interdekadische Variabilität bestimmt, die aus den Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre folgen, welche in den Globalmodellen durch die Kopplung von Ozean- und Atmosphärenmodellen erfasst werden. Die Bandbreite der Temperaturänderungen ist im Winter über den betrachteten

Zeitraum etwa gleich groß, im Jahresmittel und im Sommer nimmt sie im Verlauf der Zeitreihe zu und wird ab etwa 2030 im Wesentlichen zwischen den antreibenden Globalmodellen BCM und den verschiedenen Versionen von HadCM3 aufgespannt.

6 Niedersachsen

6.1 Das Projekt KLIFF

KLIFF ist ein vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur finanzierter Forschungsverbund (s. Anhang II), der für eine Dauer von fünf Jahren konzipiert ist. Koordiniert wird KLIFF vom Forschungszentrum Waldökosysteme in Göttingen. Ziel von KLIFF ist es, die notwendige Wissensbasis zu schaffen, um sinnvolle und realisierbare Anpassungsstrategien zu entwickeln und um Wege aufzuzeigen, diese umzusetzen. Dabei wird für ausgewählte, vom Klimawandel betroffene Regionen Niedersachsens interdisziplinär an Lösungskonzepten gearbeitet. Im Zentrum stehen dabei die drei großen Wirtschaftszweige Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Wasserwirtschaft sowie der Küstenschutz. Als Modellregionen sind der Küstenraum, das Aller-Leine-Einzugsgebiet sowie der Harz und die Heide ausgewählt. In diesen Regionen kann an bereits laufende und geplante Projekte zur Anpassung an den Klimawandel angeknüpft werden.

Neben fünf fachlichen Forschungsthemen (Pflanzenproduktion, Tierproduktion, Wald, Binnengewässer, Küste) gibt es im Forschungsverbund KLIFF zwei Querschnittsthemen. Das Erste liefert für alle Teilprojekte Informationen über die zukünftig zu erwartenden klimatischen Veränderungen auf regionaler Ebene. Hierzu gehört auch die Bereitstellung regionaler Klimamodelldaten. Für die täglichen Niederschlagssummen sowie die Tagesmittel, die Tagesminima und die Tagesmaxima der 2 m-Temperatur wurden zusätzlich bias-korrigierte Datensätze erzeugt und für die Verwendung in Klima-Impakt-Modellen zur Verfügung gestellt. Das zweite Querschnittsthema, das der Integration aller Teilprojekte dient, ist die Einbeziehung der räumlichen Planung. In engem Kontakt mit Betroffenen und Handelnden, der Politik und Wissenschaft wird die Entwicklung und Umsetzungsfähigkeit von Anpassungsstrategien diskutiert und vorangetrieben.

Zusätzlich wird durch interdisziplinäre, themenübergreifende Forschungsgebiete eine Vernetzung innerhalb von KLIFF gewährleistet. In Form von vier integrierten Arbeitsgruppen sollen diese Bereiche einer Analyse unterzogen und einer Lösung zugeführt werden. Diese beschäftigen sich mit:

- klimagesteuerter Populationsdynamik von Schädlingen und Pathogenen
- standortsspezifischer Produktions- und Vegetationsentwicklung
- genetischen und physiologischen Anpassungsprozessen von Pflanzen- und Pflanzbeständen
- Wasser- und Stoffhaushalt von Landnutzungssystemen

Als zentrale Ergebnisse von KLIFF sollen Informationen über das mögliche Ausmaß und die Folgen eines Klimawandels geliefert werden, verbunden mit sinnvollen und möglichen Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Entwicklung Niedersachsens.

6.2 Bias-korrigierte Datensätze

Im Rahmen von KLIFF wurde vereinbart, bias-korrigierte Datensätze, die in Kapitel 4 angesprochen wurden, von REMO- und CLM-Simulationen zu erzeugen und für Impaktmodellierer zur Verfügung zu stellen. Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur statistischen Bias-Korrektur, die unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. In KLIFF wurde entschieden, die bereits veröffentlichte Methode von PIANI ET AL. (2010) zu verwenden, mit der tägliche bias-korrigierte Datensätze von 2 m-Temperatur und Niederschlag generiert werden können. Eine Einführung zu Bias-Korrekturen im Allgemeinen mit einer kurzen Beschreibung dieser Methode findet sich in MUDELSEE ET AL. (2010).

Als geeigneter Beobachtungsdatensatz wurde der REGNIE-Datensatz des DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2011) herangezogen, der auf einem Gitter mit ca. 1 x 1 km²

horizontalen Auflösung vorliegt. Die Bias-Korrektur passt die Statistik der simulierten Niederschläge der Statistik der Beobachtungsdaten an (Abbildung 4.8). Die von REMO simulierten Niederschläge der nahen Vergangenheit sind in Niedersachsen vor allem im Sommer deutlich zu hoch (Abbildung 6.1). Der von CLM simulierte Niederschlag verhält sich ähnlich (nicht gezeigt). Die größten Abweichungen von den REGNIE-Beobachtungsdaten sind im Gebiet des Harz' und an den Küsten zu erkennen (Abbildung 4.7). Deshalb ist eine Bias-Korrektur des Niederschlags für die Impaktstudien in KLIFF sinnvoll.

Für die Tagesmittel-, Minimum- und Maximumtemperatur wurde bisher empfohlen, unkorrigierte Klimamodelldaten zu verwenden. Dennoch steht KLIFF für das Gebiet Niedersachsen ein täglicher Beobachtungsdatensatz mit hoher Stationsdichte zur Verfügung (HABERLANDT ET AL., 2010), der für eine Bias-Korrektur der simulierten Temperatur in diesem Gebiet verwendet werden kann.

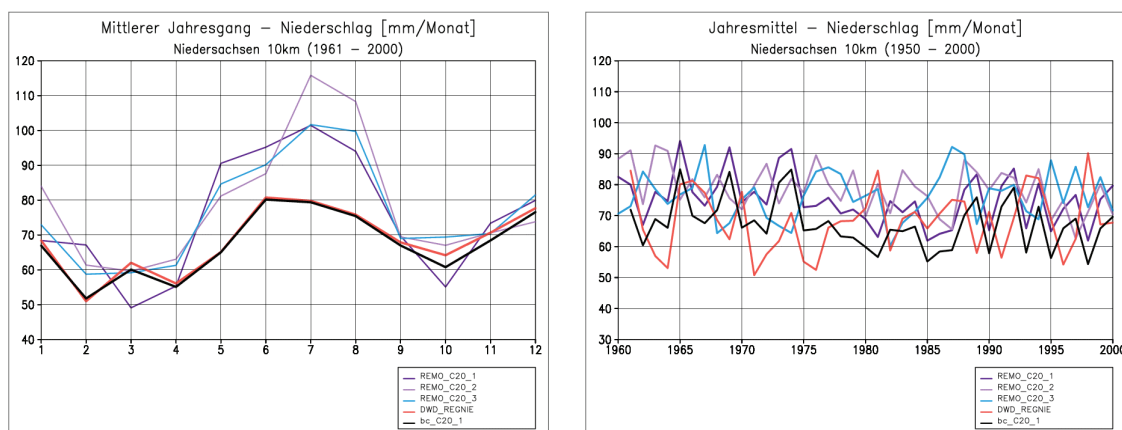


Abbildung 6.1: Links: Klimatologischer Jahresgang des Niederschlags [mm/Monat] (Gebietsmittel für Niedersachsen) für drei REMO-Realisierungen, sowie die bias-korrigierte 1. Realisierung und den REGNIE-Beobachtungsdaten (Zeitraum 1961-2000). Rechts: Jahresmittel für dieselben Datensätze

Ein Vergleich der von REMO und CLM simulierten 2 m-Temperatur mit der 2 m-Temperatur des Beobachtungsdatensatzes von HABERLANDT ET AL. über das Gebietsmittel für Niedersachsen ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Niederschlags- und Temperaturbeobachtungsdatensätze des DWD sind nicht zusätzlich in die Abbildungen eingezeichnet, weil ihre Abweichung zu dem Beobachtungsdatensatz von HABERLANDT ET AL. mit ganzjährig deutlich weniger als 0.5 K wesentlich geringer ist als die Abweichung zwischen den Beobachtungen und den Klimamodelldaten. Dies bedeutet, dass der Bias von REMO bzw. CLM, der in den Abbildungen 4.6 und 4.7 für Gesamtdeutschland gegen den Beobachtungsdatensatz des DWD dargestellt ist, in Niedersachsen im Wesentlichen unabhängig davon bleibt, ob der Beobachtungsdatensatz von HABERLANDT ET AL. oder die DWD-Beobachtungen als Grundlage verwendet werden. Die von REMO simulierte Mitteltemperatur ist im Frühjahr und im Herbst etwas höher als die der Beobachtungen, in der Harz-Region bis über 1 K. Die Differenzen zwischen der simulierten täglichen Minimum- und Maximumtemperatur sind etwas geringer als die des Beobachtungsdatensatzes. Deshalb könnte auch hier eine Bias-Korrektur für beide Modelle notwendig werden. Die von CLM simulierten Temperaturen sind dagegen ganzjährig im Mittel ca. 1 K zu kühl, so dass für CLM eine Verwendung bias-korrigierter Temperaturen in Frage kommen könnte, während dies für die REMO-Simulationen wegen des vergleichsweise geringeren Temperatur-Bias möglicherweise nicht notwendig ist.

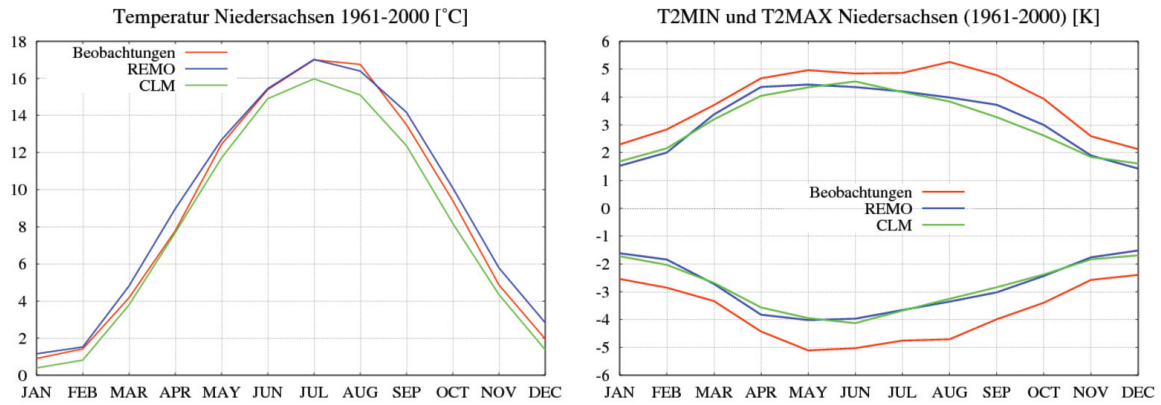


Abbildung 6.2: Links: Klimatologischer Jahresgang der 2 m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Niedersachsen) für das Mittel aus je 3 REMO- und CLM-Realisierungen für den Zeitraum 1961-2000 und aus dem Beobachtungsdatensatz von HABERLANDT ET AL.. Rechts: Klimatologischer Jahresgang der mittleren Differenzen der Tagesminimal- und Tagesmaximaltemperatur der 2 m-Temperatur [K] von der Tagesmitteltemperatur

7 Metropolregion Hamburg

7.1 Das Projekt KLIMZUG-NORD

Die BMBF-Fördermaßnahme KLIMZUG – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten – fördert innovative Anpassungsstrategien an den Klimawandel in sieben Modellregionen in Deutschland. In der Metropolregion Hamburg setzt das Verbundprojekt KLIMZUG-NORD (s. Anhang II) den Fokus auf Entwicklung, Ausbau und Umsetzung eines interdisziplinären Netzwerks zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Behörden und Öffentlichkeit zur Entwicklung strategischer Anpassungsansätze an den Klimawandel in dieser Region. Die drei Themenfelder „Ästuarmanagement“, „Integrierte Stadt- und Raumentwicklung“ und „Zukunftsfähige Kulturlandschaften“ sind vielfältig über fünf Querschnittsaufgaben miteinander vernetzt. Die Ergebnisse münden in einen Synthesebericht („Kursbuch 2050“) zum Klimafolgenmanagement in der Metropolregion Hamburg für den Zeithorizont bis 2050.

Das Max-Planck-Institut für Meteorologie stellt über die Querschnittsaufgabe Q1 Klimawandel für sämtliche Teilprojekte Klimaänderungsinformationen für Norddeutschland bereit und berät zum Umgang mit regionalen Klimadaten und ihren Unsicherheiten. Im intensiven Dialog mit den Projektpartnern wird eine sinnvolle und konsistente Verwendung von Klimadaten abgestimmt. In Teilprojekt T3.1 werden darüber hinaus weitere regionale Klimaprojektionen erstellt und die Bandbreite und Robustheit der mit dem regionalen Modellensemble simulierten Klimaänderungen analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden dann wiederum über Q1 an die Teilprojekte weitergegeben. Im Folgenden werden einige Beispielergebnisse vorgestellt.

7.2 Bandbreite der projizierten Klimaänderungen

Um die Auswirkungen des projizierten regionalen Klimawandels auf die Metropolregion Hamburg zu untersuchen, werden in KLIMZUG-NORD vorwiegend die räumlich hochaufgelösten Simulationsergebnisse der dynamischen Regionalmodelle REMO und CLM verwendet. Es werden unter anderem die Auswirkungen auf den Abfluss in den Oberflächengewässern und die Grundwasserneubildung, den Wasser- und Stoffhaushalt der Böden, das Pflanzenwachstum in den ländlichen Räumen und die Wärmebelastung in den Städten untersucht. Beide Regionalmodelle sind mit Ergebnissen des globalen, gekoppelten Modellsystems ECHAM5/MPI-OM angetrieben. Die Simulationen und ihre Methodik sind in den Kapiteln 2 und 4 dargestellt, das Projektgebiet Metropolregion Hamburg ist in Abbildung 4.1 gezeigt.

In Abbildung 7.1 sind die Jahresmittelwerte der bodennahen Lufttemperatur und des Niederschlags der REMO- und CLM-Simulationen für den Zeitraum 1960-2000 für die Metropolregion Hamburg im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD dargestellt. Die unterschiedlichen zeitlichen Abfolgen der simulierten und beobachteten Temperatur- und Niederschlagswerte beruhen auf interner Klimavariabilität, also natürlichen Klimaschwankungen von Jahr zu Jahr und von Dekade zu Dekade. Werden allerdings die beobachteten Werte über einen langen Zeitraum (z. B. 30 Jahre) systematisch über- oder unterschätzt, liegt ein Modell-Bias vor (s. auch Kapitel 4.3).

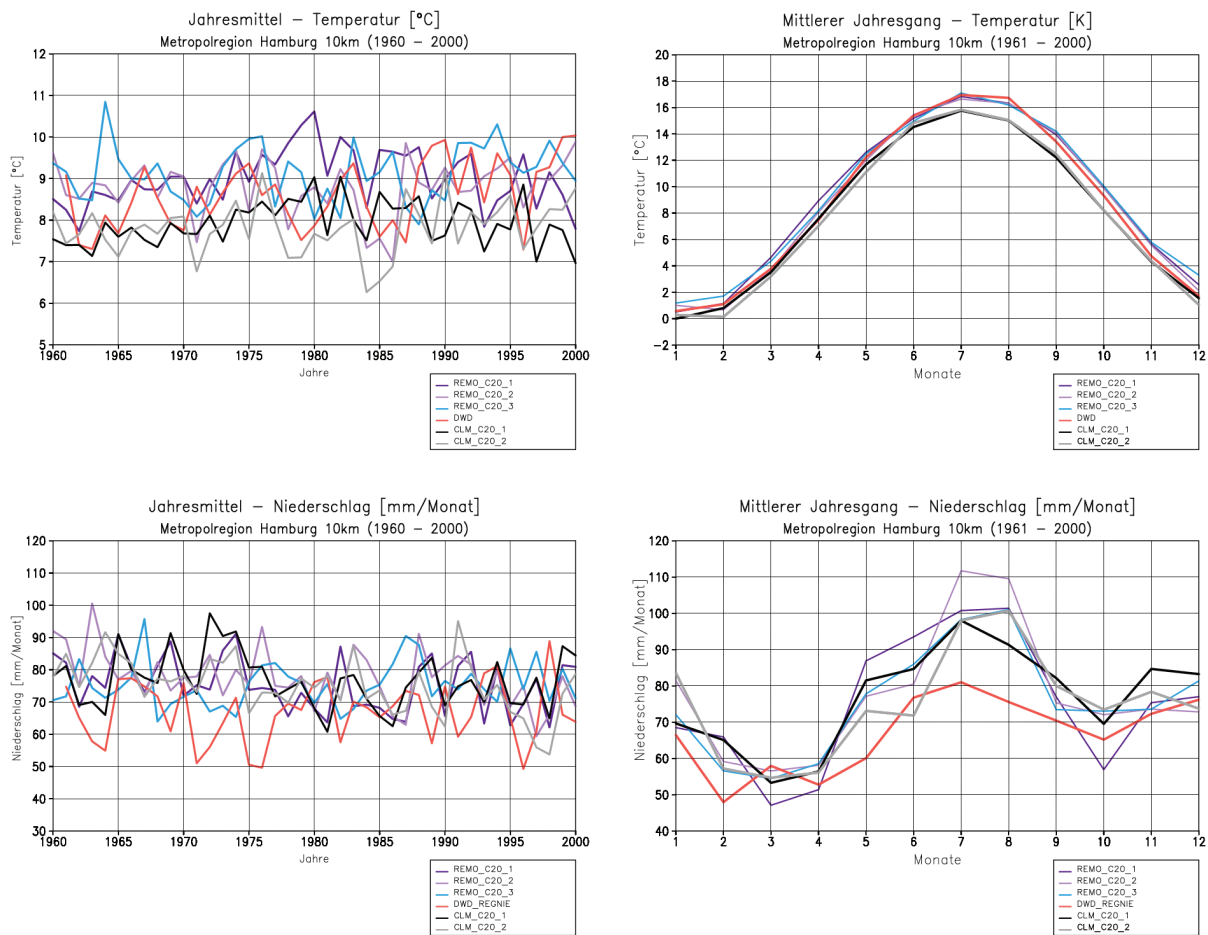


Abbildung 7.1: Simulierte Jahresmittel der Einzeljahre (links) und des mittleren Jahresgangs 1961-2000 (rechts) der 2 m-Temperatur [°C] (oben) und des Niederschlags [mm/Monat] (unten) in der Metropolregion Hamburg im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD

Im mittleren Jahresgang zeigen die CLM Simulationen eine Unterschätzung der Temperatur im Sommerhalbjahr, während die REMO-Simulationen die Temperaturen im Winter überschätzen. Beim Niederschlag werden die beobachteten Werte von beiden Modellen vor allem im Sommer deutlich überschätzt. Mit der Annahme, dass der Bias im zukünftigen projizierten Klima gleich groß ist, kann das Änderungssignal aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen abgeleitet und als Information in der Klimafolgenforschung verwendet werden. Werden zum Antrieb der Wirkmodelle absolute Werte der simulierten Klimaparameter verwendet, sind oft Bias-Korrekturen nicht zu vermeiden, aber nur dann sinnvoll, wenn eine systematische Abweichung vorliegt. Dazu wurde eine quantitative Evaluierung der Simulationsergebnisse von REMO und CLM für das Klima der C20-Simulationen in der Metropolregion Hamburg in einer Studie von SCHOETTER ET AL. (2012) vorgenommen. Hier wird anhand verschiedener Maßzahlen unter Einbezug sowohl der simulierten internen Klimavariabilität als auch der Unsicherheiten verschiedener Beobachtungsdatensätze ermittelt, ob und welche systematischen Abweichungen der Modellergebnisse gegenüber den Beobachtungen vorliegen.

Die Zeitreihen der projizierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen in der Metropolregion Hamburg sind in Abbildung 7.2 und 7.3 als fortlaufende 31-Jahresmittel jeweils in Bezug zum Referenzzeitraum 1971-2000 gezeigt. Diese sind mit den einzelnen Jahreswerten aller Simulationen in grau hinterlegt. Die Jahreswerte verdeutlichen die interanuelle Variabilität. Vor allem die jährlichen Temperaturschwankungen zeigen im Winter (Dezember-Januar-Februar) eine höhere Variabilität als im Sommer (Juni-Juli-August). Im Klimamittel zeigt sich in allen Simulationen eine Zunahme der bodennahen Lufttemperatur,

die im Winter deutlich stärker ausfällt als im Sommer. Die Niederschläge zeigen im Winter zur Mitte des Jahrhunderts in allen Simulationen eine Zunahme, während sich im Sommer erst zum Ende des Jahrhunderts eine Veränderung abzeichnet, wobei die meisten Simulationen eine Abnahme projizieren.

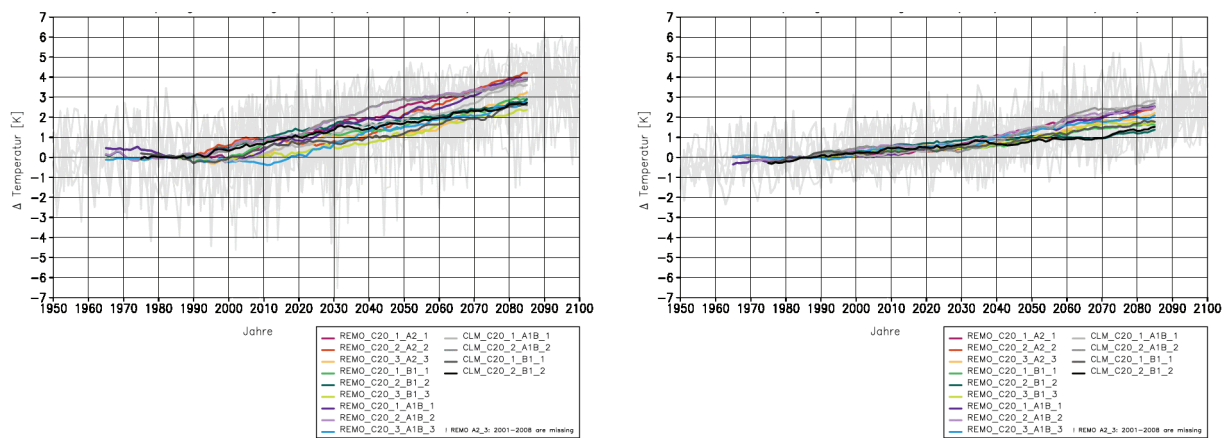


Abbildung 7.2: Projizierte Änderung der 2 m-Temperatur [K] simuliert mit REMO und CLM im Winter (links) und im Sommer (rechts) für MRH relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in Grau die Jahreswerte aller Simulationen

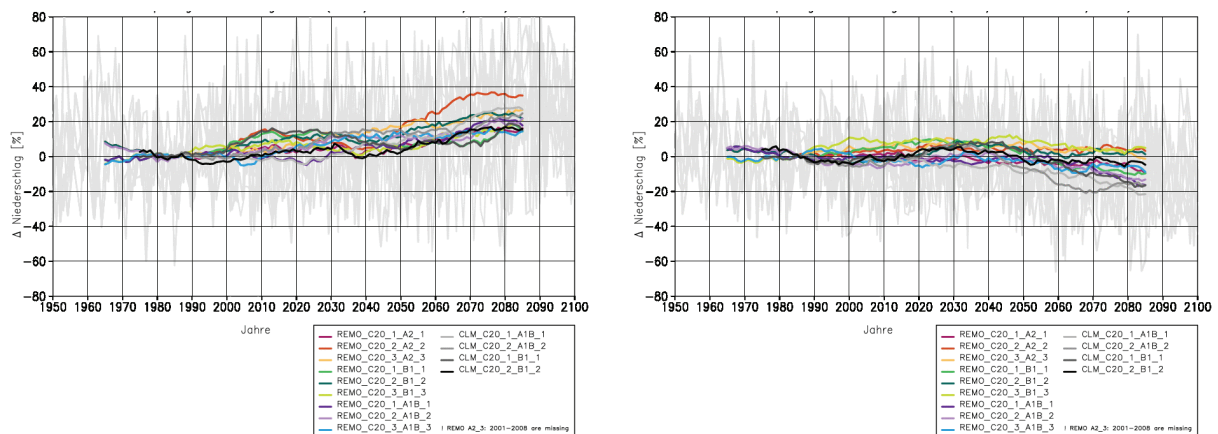


Abbildung 7.3: Projizierte Änderung des Niederschlags [%] im Winter (links) und im Sommer (rechts) simuliert mit REMO und CLM für MRH relativ zu 1971-2000 (gleitendes 31-Jahresmittel); in Grau die Jahreswerte aller Simulationen

In Abbildung 7.4 sind die Mittelwerte und Bandbreiten der Temperatur- und Niederschlagsänderungen in der Metropolregion Hamburg jeweils zur Mitte (2036 -2065) und zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) für alle Simulationen der beiden Regionalmodelle ohne separate Betrachtung der einzelnen Szenarien zusammengefasst. Es sind neben den Änderungen der Klimamittel im Winter und Sommer auch die Änderungen im Jahresmittel sowie in Frühjahr (März-April-Mai) und Herbst (September-Oktober-November) dargestellt.

Im Jahresmittel ergibt sich eine Zunahme um 1.4 K zur Mitte des Jahrhunderts mit einer Bandbreite von knapp 0.9 K bis 2 K und um 2.5 K (1.9 K bis 3.3 K) zum Ende des Jahrhunderts. Die Erwärmung im Winter beträgt im Mittel 1.9 K (1.2 K bis 3 K) um 2050 und 3.3 K (2.4 K bis 4.3 K) zum Ende des Jahrhunderts, im Sommer 1.2 K (0.8 K bis 1.5 K) und 2.1 K (1.4 K bis 2.9 K). Im Frühjahr ist die Erwärmung am geringsten, hier ist um 2050 die Bandbreite größer als das mittlere Änderungssignal. In den anderen Jahreszeiten ist die mittlere Änderung der Temperatur größer als die Bandbreite der Simulationsergebnisse. Die Niederschläge nehmen zur Mitte des Jahrhunderts im Jahresmittel um etwa 8 % (3 % bis 14

%) zu, zum Ende des Jahrhunderts um etwa 9 % (4 % bis 19 %). Dabei sehen die Änderungen im Jahresverlauf sehr unterschiedlich aus. Während im Winter der Niederschlag um etwa 10 % (3 % bis 18 %) zur Mitte und um 20 % (14 % bis 36 %) zum Ende des Jahrhunderts zunimmt, zeigt er im Sommer um 2050 keine eindeutige Veränderung mit einer Bandbreite von -10% und +9%, doch zum Ende des Jahrhunderts zeigen die meisten Simulationen eine Abnahme der Niederschläge. Allerdings ist der Betrag der mittleren Änderung von 9% kleiner als die Bandbreite -22 % bis +5 % und damit sehr unsicher.

Die Mittelwerte und Bandbreiten der Temperatur- und Niederschlagsänderungen wurden auch für alle Landkreise der Metropolregion Hamburg ausgewertet und in einer Übersicht bereitgestellt (<http://klimzug-nord.de/file.php/2011-09-15-Rechid-Diana-2011-Daten-und-Informationen-zum-Klimawa>).

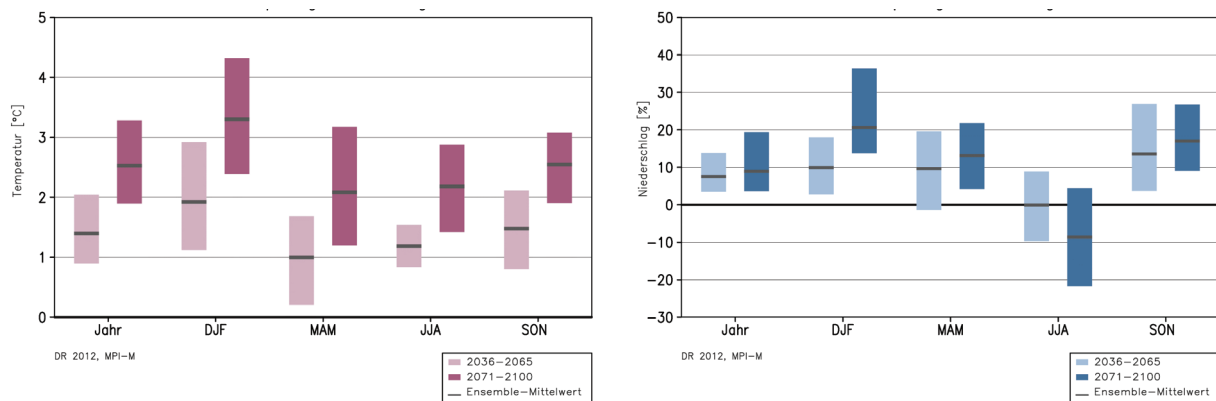


Abbildung 7.4: Mittelwert und Bandbreite der projizierten Änderungen der 2 m-Temperatur [°C] (links) und des Niederschlags [%] (rechts) simuliert mit REMO und CLM zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts relativ zu 1971-2000

Die hier dargestellten Beispielergebnisse verdeutlichen die Bandbreite der Klimaänderungen, die sich aus der Verwendung von zwei Regionalmodellen in Kombination mit demselben Globalmodell, der Verwendung mehrerer Realisierungen für je ein Szenario und der Annahme verschiedener Emissionsszenarien ergeben. Die Zeitreihen zeigen insgesamt eine leichte Zunahme der Bandbreite zum Ende des Jahrhunderts aufgrund der Annahme unterschiedlicher Emissionsszenarien. Für viele Fragestellungen und Anwendungen ist es sinnvoll, die für die verschiedenen Emissionsszenarien projizierten Klimaänderungssignale separat zu betrachten. Hier wurde eine integrative Betrachtung der Projektionen für alle Szenarien vorgenommen, die auch die Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen mit einbezieht.

Weiterhin ergeben sich ebenso wie für das Flächenmittel von Deutschland (vgl. Kapitel 3 und 4) auch für die Metropolregion Hamburg größere Bandbreiten der Temperatur- und Niederschlagsänderungen aus den Simulationen nur des A1B Szenarios von 16 verschiedenen Global-/Regional-Modellkombinationen, die im Rahmen des Projekts ENSEMBLES erstellt wurden. Diese Ergebnisse werden im Zwischenbericht Mai 2011 des Teilprojektes 3.1 in KLIMZUG-NORD gegenübergestellt:

<http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-07-02-EinzelheitenT3.1>

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Dieser Bericht stellt einige Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen zusammen, die für Europa und Deutschland erstellt wurden und als Datengrundlage in verschiedenen Forschungsprojekten dienen. Die Arbeiten in den Projekten widmen sich unterschiedlichen geografischen Regionen und Themenschwerpunkten. Ihnen gemeinsam ist die Notwendigkeit, sich mit den Unsicherheiten der Klimaprojektionen auseinanderzusetzen und die daraus folgenden Bandbreiten der projizierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen in der Bewertung der Anfälligkeiten und Risiken und der Ableitung von Handlungsoptionen zu berücksichtigen.

Wie mit den Bandbreiten der Klimaprojektionen umzugehen ist, hängt sehr stark von der jeweiligen Fragestellung, dem betrachteten Zeithorizont und der Art der Anwendung ab. In dem Projekt KLIWAS werden Simulationsergebnisse der zahlreichen Global-Regionalmodell-Kombinationen des ENSEMBLES Projekts sowie der hochaufgelösten REMO- und CLM-Simulationen in der Abflussmodellierung verwendet, um die Bandbreite der Auswirkungen auf das Abflussregime im Rheineinzugsgebiet zu erfassen. In den Projekten KLIFF und KLIMZUG-NORD haben sich die Projektpartner auf die Verwendung der hochaufgelösten Simulationen von REMO und CLM geeinigt, da in diesen Projekten die Untersuchungsgebiete oft sehr kleinräumig sind und der Bedarf nach weiterer räumlicher Verfeinerung der Daten oft gegeben ist. Die Fragestellungen sind sehr vielfältig und die Anwendung der Klimaprojektionen reicht von der Ableitung einfacher qualitativer Aussagen zum Klimawandel in den Projektregionen bis hin zur Verwendung der Klimaparameter in Impaktmodellen. Hierbei wurde der Bedarf an bias-korrigierten Klimadaten festgestellt.

Bias-Korrekturen sind prinzipiell nur sinnvoll, wenn überhaupt systematische Abweichungen der Modellergebnisse gegenüber Beobachtungen vorliegen. Ob in der Impaktmodellierung die Verwendung bias-korrigierter Klimadaten sinnvoll ist, hängt dann von dem jeweiligen Wirkmodell ab. In jedem Fall liegt der Anwendung von Bias-Korrekturen auf Klimaprojektionen die Annahme zugrunde, dass der Bias unter zukünftigen Klimabedingungen gleich bleibt. Sind für das Modell die absoluten Werte der Klimaparameter notwendig und reagiert das Modell sehr sensitiv auf ein unterschiedliches Ausgangsniveau der Daten, ist die Verwendung bias-korrigierter Daten oft nicht zu vermeiden. Sind für das Modell jedoch verschiedene Klimaparameter notwendig, müssen diese zueinander konsistent sein. Die Verwendung bias-korrigierter Daten ist dann nur bei Erhalt der Konsistenz möglich. Zudem hängen die Bias-Korrekturen von den zur Korrektur verwendeten Beobachtungsdaten ab, die ebenso Unsicherheiten aufweisen.

Neben den Unsicherheiten der Modellierungsmethoden, die prinzipiell durch Verbesserung der Methoden verringert werden können, bestehen systemimmanente Unsicherheiten durch die natürliche Variabilität des Klimas. Die natürliche Klimavariabilität entsteht zum einen durch externe Einflüsse wie Schwankungen der Solarstrahlung und zum anderen durch interne Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems Atmosphäre, Ozean und Landoberfläche. Kurzfristigere Schwankungen, wie von Monat zu Monat oder von Jahr zu Jahr, werden in den Klimasimulationen des letzten und dieses Jahrhunderts berücksichtigt und können für den Zeitraum, für den Beobachtungsdaten vorliegen, evaluiert werden. Langfristigere Klimaschwankungen wie von Jahrzehnt zu Jahrzehnt versucht man in der Klimamodellierung durch mehrere Realisierungen der Klimasimulationen zu erfassen, die sich jeweils nur in den Anfangsbedingungen unterscheiden, denen aber identische Treibhausgaskonzentrationen vorgeschrieben werden. Im Idealfall stimmt die simulierte Klimavariabilität mit der beobachteten Variabilität des Klimas überein. Dies ist jedoch schwierig zu belegen, da die verfügbaren Beobachtungsreihen meist zu kurz sind. Die simulierten Schwankungen geben zumindest einen Hinweis auf die Bandbreite natürlicher Klimaschwankungen, die auch in der Klimafolgenforschung berücksichtigt werden müssen.

Die Bandbreite der anthropogenen Klimaänderungen schließlich entsteht durch die Annahme verschiedener Emissionsszenarien, mit denen mögliche Klimaentwicklungen projiziert werden. Innerhalb dieser Klimaprojektionen kann sich zudem auch die interne Klima-

variabilität verändern. Ob in der Klimafolgenforschung nur eine oder verschiedene dieser Möglichkeiten der zukünftigen Entwicklung betrachtet werden, hängt wiederum von der zu untersuchenden Fragestellung ab. Bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und der Ableitung von Handlungsoptionen ist in jedem Fall das Bewusstsein für die Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen eine wichtige Grundlage.

Der vorliegende Bericht versucht diese Grundlage auf der Basis der aktuell verfügbaren Klimasimulationen für Europa und Deutschland zu vermitteln.

Derzeit werden eine Vielzahl neuer globaler Klimaprojektionen im Rahmen des 5. Sachstandsberichts des Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel (AR5 IPCC) erstellt (geplante Veröffentlichung 2014). Diesen liegt ein neues Konzept für die Erstellung von Szenarien zugrunde, die sogenannten „Representative Concentrations Pathways“ (RCPs) (MOSS ET AL., 2010). Sie repräsentieren die Entwicklungspfade der Treibhausgaskonzentrationen entsprechend eines vorgegebenen Strahlungsantriebs, der neben Treibhausgasemissionen auch Landnutzungsänderungen berücksichtigt. RCP8.5 geht von einem fortlaufend zunehmenden Strahlungsantrieb aus, der 2100 bei 8.5 Wm^{-2} liegt. RCP4.5 erreicht 2100 einen Strahlungsantrieb von 4.5 Wm^{-2} und stabilisiert sich danach auf diesem Wert. RCP2.6 erreicht seinen maximalen Strahlungsantrieb mit 3.0 Wm^{-2} vor 2100 und nimmt anschließend bis 2100 auf 2.6 Wm^{-2} ab (VAN VUREN ET AL., 2009).

Im Rahmen des international koordinierten „Coupled Model Intercomparison Projects Phase 5“ CMIP5 (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) erstellen weltweit etwa 20 Modellierungsgruppen verschiedene Klimaprojektionen mit gekoppelten Globalmodellen bzw. Erdsystem-Modellen. Am MPI-M werden mit dem neu entwickelten Erdsystem-Modell MPI-ESM die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 als deutscher Beitrag zum AR5 IPCC gerechnet.

Die globalen Klimasimulationen werden im Rahmen des vom „World Climate Research Program“ (WCRP) initiierten internationalen „COordinated Downscaling Experiments“ (CORDEX) für mehrere Regionen der Erde mit verschiedenen regionalen Klimamodellen räumlich verfeinert. Viele der Daten werden über das Klimadatenarchiv am Dänischen Meteorologischen Institut (DMI) (<http://cordex.dmi.dk/joomla/>) für die Anwendung in der Klimafolgenforschung bereitgestellt. Am CSC wird gemeinsam mit dem Wegener Center der Universität Graz die Initiative EURO-CORDEX (<http://www.euro-cordex.net/>) koordiniert (Anhang II). In dieser Initiative haben sich mehrere europäische Arbeitsgruppen zusammengeschlossen, die mit verschiedenen regionalen Klimamodellen und „Downscaling“ Methoden möglichst zahlreiche globale Klimasimulationen des CMIP5 für Europa verfeinern. Diese Simulationen werden in Ergänzung der bisher verfügbaren Erkenntnisse die Wissensbasis zu möglichen Klimaänderungen in Europa erweitern.

9 Literaturverzeichnis

- ALEXANDRU, A., R. DE ELIA, R. LAPRISE, 2007: Internal variability in Regional Climate Downscaling at the Seasonal Scale. *Monthly Weather Review*, 135 (9), 3221-3238.
- ASSELIN, R., 1972: Frequency filter for time integrations. *Monthly Weather Review*, 100, 487-490.
- BENGTTSSON L., HODGES K.I., ROECKNER E., BROKOPF R., 2006: On The Natural Variability of the Pre-Industrial European Climate', *Climate Dynamics* DOI: 10.1007/s00382-006-0168-y, 1s-18
- BÖHM, U., M. KÜCKEN, W. AHRENS, A. BLOCK, D. HAUFFE, K. KEULER, B. ROCKEL, A. WILL, 2006: CLM The climate version of LM: Brief description and long-term application. Proceedings from the COSMO General Meeting 2005. COSMO Newsletter 6.
- DWD DEUTSCHER WETTERDIENST: Abteilung Hydrometeorologie: REGNIE (REGionalisierte NIEederschläge): Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung, interner Bericht im DWD, Offenbach 2011.
- HABERLANDT, U., S. VAN DER HEIJDEN, A. VERWORN, J. DIETRICH, 2010: Regionalisierung der Klimabeobachtungsdaten für Niedersachsen als Grundlage für mittel- bis großskalige Modellierungen. Teilbericht zu den Projekten KliBiW und KLIFF, Institut für Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover.
- HAYLOCK, M.R., N. HOFSTRA, A.M.G. KLEIN TANK, E.J. KLOK, P.D. JONES AND M. NEW, 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, **113**, D20119
- HEWITT, C.D , D.J GRIGGS, 2004: Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES). *Eos Trans. AGU*, 85 (52), 566.
DOI:10.1029/2004EO520005.
- HOLLWEG, H.-D., U. BÖHM, I.FAST, B. HENNEMUTH, K. KEULER, E. KEUP-THIEL, M. LAUTENSCHLAGER, S. LEGUTKE, K. RADTKE, B. ROCKEL, M. SCHUBERT, A. WILL, M. WOLDT, C. WUNRAM, 2008: Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios, Technical Report 3, Modelle and Daten at the Max Planck Institute for Meteorology, 150.
- IPCC, SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K. B. AVERYT, M. TIGNOR AND H.L. MILLER (eds.), 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 996.
- JACOB, D., R. PODZUN, 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63 (1-2), 119-129.
- JACOB, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77 (1-4), 61-73.
- JACOB, D., U. ANDRAE, G. ELGERED, C. FORTELIUS, L. P. GRAHAM, S. D. JACKSON, U. KARSTENS, CHR. KOEPKEN, R. LINDAU, R. PODZUN, B. ROCKEL, F. RUBEL, H.B. SASS, R.N.D. SMITH, B.J.J.M. VAN DEN HURK, X. YANG, 2001: A Comprehensive Model Intercomparison Study Investigating the Water Budget during the BALTEX-PIDCAP Period. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77 (1-4), 19-43.

- JACOB, D., L. BÄRRING, O.B. CHRISTENSEN, J.H. CHRISTENSEN, S. HAGEMANN, M. HIRSCHI, E. KJELLSTRÖM, G. LENDERINK, B. ROCKEL, C. SCHÄR, S.I. SENEVIRATNE, S. SOMOT, A. VAN ULDEN, B. VAN DEN HURK, 2007: An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance, PRUDENCE Special Issue. *Climatic Change*, 81, 31-52. DOI 10.1007/s10584-006-9213-4.
- JACOB D., GÖTTEL H., KOTLARSKI S., LORENZ P., SIECK K., 2008a: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. 2008: Abschlussbericht zum UFOPLAN Vorhaben 204 41 13.
- JACOB D., L. KOTOVA, P. LORENZ, C. MOSELEY, S. PFEIFER, 2008b: Regional climate modelling activities in relation to the CLAVIER project. *Quarterly Journal of the Hungarian meteorological society*, 141-153.
- KEULER K. (2006) Quantifizierung von Ungenauigkeiten regionaler Klima- und Klimaänderungssimulationen (QUIRCS). Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse eines Projekts des deutschen Klimaforschungsprogramms DEKLIM. Lehrstuhl Umweltmeteorologie, Brandenburgische Technische Universität Cottbus.
- KEULER, K.; M. LAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM; E. KEUP-THIEL; M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL,; U. BOEHM, 2009a: Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_C20_2_D2.
- KEULER, K.; M. LAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM; E. KEUP-THIEL; M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL,; U. BOEHM, 2009b: Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D2.
- KEULER, K.; M. LAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM, E. KEUP-THIEL; M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL,; U. BOEHM, 2009c: Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D2.
- KEULER, K.; M. LAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM, E. KEUP-THIEL; M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL,; U. BOEHM, 2009d: Climate Simulation with CLM, Scenario B1 run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_B1_1_D2.
- KEULER, K.; M. LAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM, E. KEUP-THIEL, M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL,; U. BOEHM, 2009e: Climate Simulation with CLM, Scenario B1 run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_B1_2_D2.
- KREIENKAMP F., A. SPEKTAT, W. ENKE, 2011: Ergebnisse regionaler Szenarienläufe für Deutschland mit der statistischen Methode WETTREG auf der Basis der SRES Szenarios A2 und B1 modelliert mit ECHAM5/MPI-OM. Bericht. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH, finanziert vom Climate-Service-Center, Hamburg.
- LAUTENSCHLAGER M., KEULER K., WUNRAM C., KEUP-THIEL E., SCHUBERT M., WILL A., ROCKEL B., BOEHM U., 2009: Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI:10.1594/WDCC/CLM_C20_1_D2.

- LUCAS-PICHER P., D. CAYA, R. DE ELÍA, R. LAPRISE, 2008: Investigation of regional climate models' internal variability with a ten-member ensemble of 10-year simulations over a large domain. *Climate Dynamics*, 31, 927-940. DOI: 10.1007/s00382-008-0384-8.
- MAJEWSKI, D., 1991: The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models, 2, 147-191.
- MAJEWSKI, D., G. DOMS, W. EDELMANN, M. GERTZ, T. HANISCH, E. HEISE, A. LINK, P. PROHL, U. SCHAETTLER, B. RITTER, 1995: Dokumentation des EM/DM-Systems. Abteilung Forschung, Deutscher Wetterdienst.
- MITCHELL, T.D, P.D. JONES, 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, 693-712.
- MPI-M, 2006: Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstrasse 53, D-20146 Hamburg.
- MOSS, R. H., J. A. EDMONDS, K. A. HIBBARD, M. R. MANNING, S. K. ROSE, D. P. VAN VUUREN, T. R. CARTER, S. EMORI, M. KAINUMA, T. KRAM, G. A. MEEHL, J. F. B. MITCHELL, N. NAKICENOVIC, K. RIAHI, S. J. SMITH, R. J. STOUFFER, A. M. THOMSON, J. P. WEYANT & T. J. WILBANKS, 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747-756.
- MUDELSEE, M., D. CHIRILA, T. DEUTSCHLÄNDER, C. DÖRING, J.O. HAERTER, S. HAGEMANN, H. HOFFMANN, D. JACOB, P. KRAHÉ, G. LOHMANN, C. MOSELEY, E. NILSON, O. PANFEROV, T. RATH, B. TINZ, 2010: Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie. *Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft* 03/2010.
- NATIONAL KOMITEE FÜR GLOBAL CHANGE FORSCHUNG, 2009: Regionale Klimamodelle – Potentiale, Unsicherheiten und Perspektiven. Positionspaper.
- ORLOWSKY B., F.-W. GERSTENGARBE, P.C. WERNER, 2008: A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM, *Theoretical and Applied Climatology*.
- PIANI, C., G.P. WEEDON, M. BEST, S.M. GOMES, P. VITERBO, S. HAGEMANN, J.O. HAERTER, 2010: Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*. 395, 199-215.
- ROCKEL, B., A. WILL, A. HENSE, 2008: The Regionale Climate Model COSMO-CLM. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol, 17, No. 4, 347-348.
- ROECKNER, E., K. ARPE, L. BENGTSSON, M. CHRISTOPH, M. CLAUSSEN, L. DUEMENIL, M. ESCH, M. GIORGETTA, U. SCHLESE, U. SCHULZWEIDA, 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. MPI- Report Nr. 218.
- SCHOETTER R., P. HOFFMANN, D. RECHID, K.H. SCHLÜNZEN, 2012: Evaluation and bias correction of regional climate model results using model evaluation measures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. In Review.
- SRES 2000 – NAKICENOVIC N., R. SWART (eds.), 2000: Emission Scenarios. Cambridge University Press, UK. pp 570

- STEPPELER, J., G. DOMS, U. SCHÄTTLER, H.W. BITZER, A. GASSMANN, U. DAMRATH, G. GREGORIC, 2003: Meso-gamma scale forecasts using the non-hydrostatic model LM. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 82, 75–96.
- VAN DER LINDEN P., J.F.B. MITCHELL (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 160.
- VAN VUUREN D., K. RIAHI, S. SMITH, M. MEINSHAUSEN, M. MASTRANDREA, R. MOSS, 2009: RCP Extension White Paper: http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/DraftRCPEExtension_WhitePaper_26Jul09.pdf

Anhang I: Regionale Klimamodelle in Deutschland

REMO

(<http://www.remo-rcm.de>)

Das dreidimensionale, hydrostatische, regionale Klimamodell REMO (**R**egional **M**odell) ist ein atmosphärisches Zirkulationsmodell, das die relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet (JACOB, 1997; JACOB, 2001; JACOB ET AL., 2001; JACOB ET AL., 2007). Hierdurch werden insbesondere nicht-lineare Zusammenhänge berücksichtigt. Subskalige, das heißt nicht vom Modell auflösbare physikalische Prozesse wie z. B. Konvektionsbildung, werden durch sogenannte physikalische Parametrisierungen berechnet.

REMO ist aus dem Europa-Modell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hervorgegangen (MAJEWSKI, 1991; MAJEWSKI ET AL., 1995). Die prognostischen Variablen des Modells sind die horizontalen Windkomponenten, der Bodendruck, die Temperatur, die spezifische Feuchte sowie der Flüssigwassergehalt. Es kann alternativ mit den physikalischen Parametrisierungen des Europa-Modells des DWD und mit denen des globalen Klimamodells ECHAM4 (ROECKNER ET AL., 1996) betrieben werden. Für die hier vorliegenden Untersuchungen wurde REMO mit den physikalischen Parametrisierungen aus ECHAM4 verwendet, da diese auf Klimasimulationen abgestimmt sind und so außerdem eine möglichst große Konsistenz mit dem antreibenden Globalmodell erreicht wird.

Die zeitliche Integration der Modellgleichungen in REMO beruht auf dem sogenannten Leap-Frog Schema mit semi-implizierter Korrektur und Zeitfilterung nach ASSELIN (1972). In der vertikalen Dimension wird ein hybrides Koordinatensystem mit geländefolgenden Modellflächen verwendet. Die horizontale Diskretisierung beruht auf einem sogenannten Arakawa-C-Gitter, in dem alle Variablenwerte (außer den Windkomponenten) für das Zentrum der jeweiligen Gitterbox gültig sind. Die Gitterboxzentren wiederum sind auf einem rotierten sphärischen System definiert mit einheitlichem Abstand in x- und y-Richtung (je nach gewählter horizontaler Auflösung z.B. 0.44° , 0.22° oder 0.088°). REMO kann wahlweise mit (Re-)Analysedaten oder mit Informationen aus globalen Klimamodellen betrieben werden, d. h. REMO wird einmal im Simulationsgebiet mit globalen Daten initialisiert und dann während der Modellrechnung an den seitlichen Rändern mit sich kontinuierlich ändernden globalen Daten angetrieben. Am Rand werden nur Temperaturen, Druck, Winde und Luftfeuchtigkeit vorgegeben. Alle anderen Größen werden dort und im Modellgebietsinneren von REMO direkt berechnet.

Der Erdboden bzw. die Meeresoberfläche stellen den unteren Rand des Modells dar. Die Landflächen werden durch ihre Höhe über NN, ihre Vegetationsbedeckung, ihre Oberflächenbeschaffenheit, Rauigkeit und Bodenbeschaffenheit beschrieben, wobei zu jedem Modellzeitschritt in REMO Bodentemperaturen für 5 Erdbodenschichten bis zu einer Tiefe von 10 m berechnet werden, ebenso wie eine repräsentative Bodenfeuchte.

REMO ist ein Gitterpunktsmodell und liefert somit Ergebnisse auf einem Raster für das gesamte Simulationsgebiet. In einer Gitterzelle kann sich anteilig Wasser oder Land befinden, wobei ein Teil der Wasserfläche zusätzlich von Meereis bedeckt sein kann. Auf den Landflächen wird zwischen nacktem Boden und vegetationsbedeckten Flächen unterschieden. Der Boden kann hierbei auch teilweise oder ganz schneebedeckt sein.

Zu den berechneten Ausgabegrößen gehören die prognostischen Variablen (s.o.) ebenso wie eine Vielzahl von weiteren Größen, die z. B. die Bodentemperaturen in 5 Schichten beschreiben, oder die Bodenfeuchte, die Windverhältnisse in Bodennähe und der Wolkenbedeckungsgrad.

CLM

(<http://www.clm-community.eu/>)

Beim Modell CLM (BOEHM ET AL., 2006, ROCKEL ET AL., 2008) handelt es sich wie bei REMO um einen physikalisch-dynamischen Modellansatz. Die Lösung der dynamischen Gleichungen erfolgt jedoch ohne die sog. hydrostatische Approximation. Die Gitterstruktur, Funktionsweise sowie die verwendeten prognostischen Variablen ähneln denen des zuvor beschriebenen Modells REMO. Die horizontale Auflösung beträgt rund 18 km, der Boden wird mit insgesamt 10 Schichten bis in eine Tiefe von rund 15 Metern aufgelöst. CLM basiert auf dem Lokalmmodell (LM), einem Wettervorhersagemodell, das ursprünglich vom Deutschen Wetterdienst (DWD) (Steppeler et al., 2003) entwickelt wurde. Unter Federführung der drei Institutionen BTU Cottbus, HZG in Geesthacht und PIK in Potsdam wurde daraus ein regionales Klimamodell entwickelt. Der weitere Ausbau des CLM erfolgt in enger Abstimmung mit den Entwicklungen des COSMO-CLM des DWD in einem internationalen Netzwerk von an Universitäten und Forschungseinrichtungen tätigen Wissenschaftlern - der **CLM-Community**, deren Koordination am Lehrstuhl Umweltmeteorologie der BTU Cottbus angesiedelt ist. Gefördert durch das BMBF, wurden mit diesem Modell im Zeitraum 2007-2008 eine Reihe sog. Konsortialrechnungen am DKRZ in Hamburg durchgeführt und durch die BTU wissenschaftlich ausgewertet (Hollweg et al., 2008). Die dabei erzeugten Realisierungen der SRES Szenarien A1B und B1 sind Bestandteile dieses Berichts.

WETTREG

(<http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/WettReg/wettreg.html>)

Das statistische Regionalmodell WETTREG wurde von der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC) entwickelt. WETTREG verwendet Wetterlagenklassifikationen und setzt auf Basis ihrer Häufigkeiten und Intensitäten mittels Wettergenerator neue Zeitreihen zusammen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden mit WETTREG regionale Klimaprojektionen für Deutschland für die IPCC Szenarien A1B, B1 und A2 durchgeführt, die ebenfalls im World Data Center for Climate (WDCC) archiviert wurden: <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=WETTREG-UBA>

Ergebnisse können nachgelesen werden in dem Bericht des UBA:

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3542.pdf>

Eine neue Modellversion (WETTREG2010) berücksichtigt mit einer wesentlichen Weiterentwicklung („Übergang von der Reproduktion von Wetterelementen zur Reproduktion von deren Anomalien“ und „Einführung des Transwetterlagen-Ansatz“, (KREIENKAMP ET AL., 2011)) nun auch Wetterlagen, die gegenwärtig nicht oder nur selten auftraten. Auch hierzu liegt ein Bericht des UBA vor: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf>

STAR II

(<http://www.pik-potsdam.de/research/research-domains/climate-impacts-and-vulnerabilities/models/star>)

Das statistische Regionalmodell STARII wurde am Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelt (ORLOWSKY ET AL., 2008). Für die statistischen Analysen wird ein linearer Temperaturtrend vorgegeben, womit es auch unabhängig von den Ergebnissen globaler Klimamodellsimulationen verwendet werden kann. Mit dem STAR II Modell wurden 3 Realisierungen des A1B Szenarios für den Zeitraum von 2007 bis 2060 durchgeführt und im World Data Center for Climate (WDCC) archiviert:

<http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=STAR+II>

Das Projekt „ZWEK“

Vergleiche der regionalen Klimaprojektionen für Deutschland mit REMO, CLM, WETTREG und STARII wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) im Projekt ZWEK (Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangsdatensätzen für die Klimafolgenabschätzung) durchgeführt und unter: <http://sga.wdc-climate.de> für die Öffentlichkeit bereitgestellt.

Anhang II: Projekte – Adressen – Internetseiten

<p>ENSEMBLES http://ensembles-eu.metoffice.com/index.html</p> <p>Koordination: John Mitchell (Met Office, Hadley Centre) Projektlaufzeit: 2004-2009</p> <p>Kontakt: Paul van der Linden (Direktor) Pip Gilbert (Sekretariat) Met Office Hadley Centr, FitzRoy Road, Exeter, Devon EX1 3PB, UK ensemblesfp6@metoffice.gov.uk</p>	<p>UBA http://www.umweltbundesamt.de/</p> <p>Kontakt: Petra Mahrenholz Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau</p> <p>Umweltbundesamt Bismarckplatz 1 D-14193 Berlin info@umweltbundesamt.de</p>
<p>KLIWAS http://www.kliwas.de</p> <p>Koordination: Andrea Mehling, Dr. Sebastian Kofalk (Bundesanstalt für Gewässerkunde) Projektlaufzeit: 2009-2013</p> <p>Kontakt: (Teilprojekt 4.01) Dr. Enno Nilson BfG Am Mainzer Tor 1 D-56068 Koblenz nilson@bafg.de</p> <p>Dr. Christopher Moseley Max-Planck-Institut für Meteorologie Bundesstraße 53 D-20146 Hamburg Christopher.Moseley@zmaw.de</p>	<p>KLIFF http://www.kliff-niedersachsen.de</p> <p>Koordination: Dr. Stella Aspelmeier (Universität Göttingen) Projektlaufzeit: 2009-2013</p> <p>Kontakt: (QFT Klima) Dr. Oleg Panferov Universität Göttingen Büsgenweg 2 D-37077 Göttingen opanfyo@gwdg.de</p> <p>Dr. Christopher Moseley Max-Planck-Institut für Meteorologie Bundesstraße 53 D-20146 Hamburg Christopher.Moseley@zmaw.de</p>
<p>KLIMZUG-NORD http://klimzug-nord.de/</p> <p>Koordination: Dr. Helmut Thamer, Jürgen Becker (TuTech) Projektlaufzeit: 2009-2014</p> <p>Kontakt: Prof. Dr. Daniela Jacob Helmholtz-Zentrum Geesthacht Climate Service Center (CSC) Fischertwiete 1 20095 Hamburg Daniela.Jacob@hzg.de</p> <p>Dr. Diana Rechid Max-Planck-Institut für Meteorologie Bundesstraße 53 D-20146 Hamburg Diana.Rechid@zmaw.de</p>	<p>EURO-CORDEX http://www.euro-cordex.net/</p> <p>Koordination: Prof. Dr. Daniela Jacob (CSC), Dr. Andreas Gobiet (Wegener Center) Projektlaufzeit: 2009-2014</p> <p>Kontakt: Prof. Dr. Daniela Jacob Helmholtz-Zentrum Geesthacht Climate Service Center (CSC) Fischertwiete 1 20095 Hamburg Daniela.Jacob@hzg.de</p> <p>Dr. Claas Teichmann Max-Planck-Institut für Meteorologie Bundesstraße 53 D-20146 Hamburg Claas.Teichmann@zmaw.de</p>

Kontakt:

Climate Service Center
Fischertwiete 1
20095 Hamburg

Tel. 040-226 338-424
Fax. 040-226 338-163

www.climate-service-center.de

ISSN 2192-4058

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung